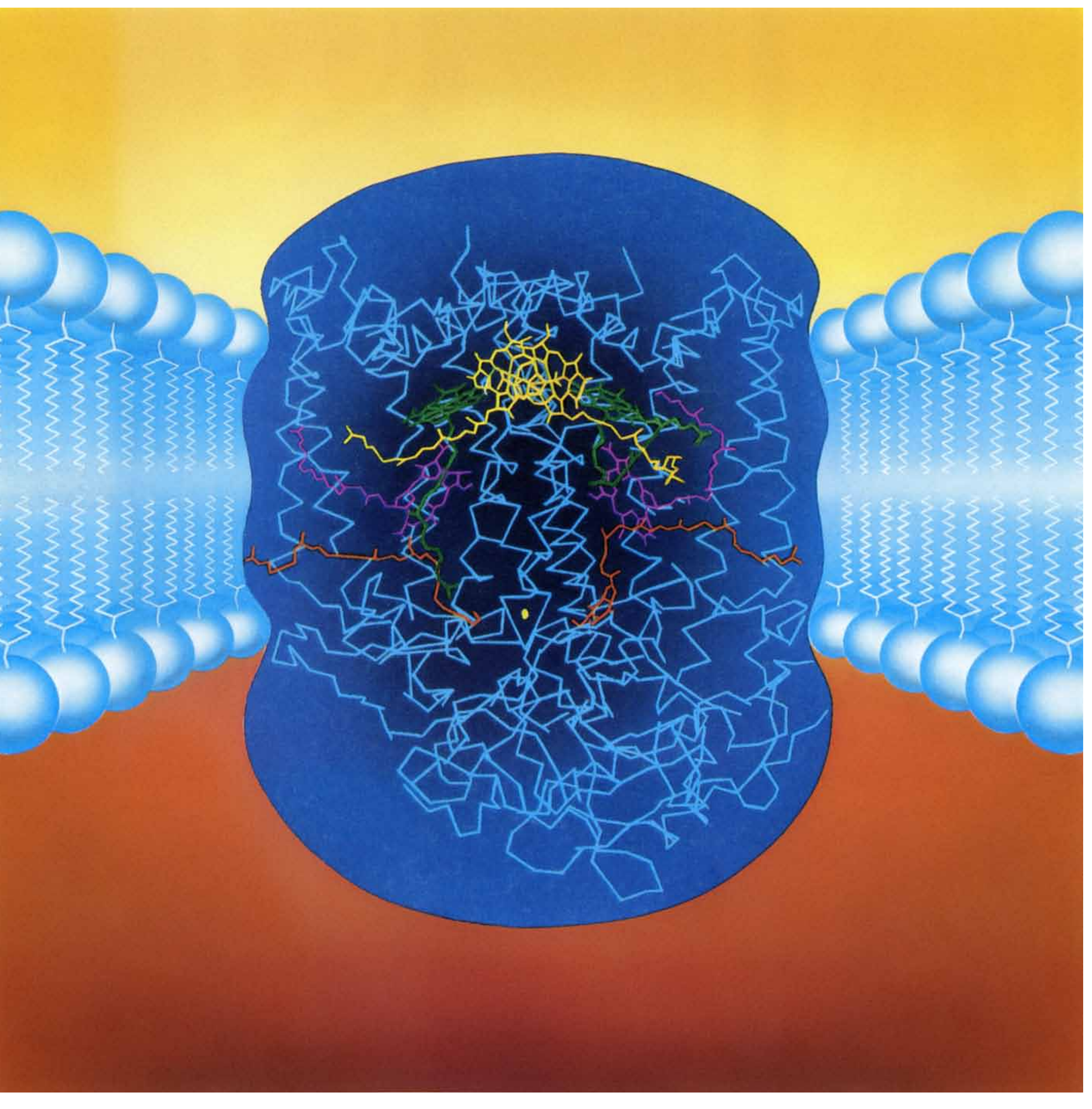
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



MECANISMO MOLECULAR DE LA FOTOSINTESIS

Agosto 1987

450 PTAS.
(IVA INCLUIDO)

Número 131
Agosto 1987

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

José Manuel García de la Mora: *Anatomía de la memoria*; Mireia Bofill Abelló: *Sequía en Africa*; Jordi Barbé García: *Mecanismo molecular de la fotosíntesis*; Manuel Puigcerver: *Observatorios de ondas gravitatorias*; Josep Mas Pla: *Hundimiento de los volcanes*; Joandomènec Ros Aragonés: *Adaptaciones al buceo de la foca de Weddell*; Luis Bou García: *La máquina de conexión* y *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

José Luis Comellas, Joandomènec Ros y Andrés Lewin-Richter



PORTADA

La pintura de la portada muestra la estructura molecular del centro fotosintético de reacción –donde se localizan los primeros estadios de la fotosíntesis– de las bacterias del género *Rhodopseudomonas*. El centro de reacción se encuentra embebido en la membrana de la estructura interna conocida por vesícula fotosintetizadora. La membrana es una bicapa lipídica: dos hojas de moléculas grasas se reúnen por las colas hidrófobas (que repelen el agua). La mayor parte del centro de reacción lo constituye un complejo proteico (*azul*). Dos espirales de las denominadas moléculas prostéticas, que se encuentran en un "par especial" de moléculas de clorofila (*amarillo*), y otras de quinona, aparecen embebidas en la proteína. El par especial absorbe la energía de los fotones (cuantos de luz). Un esfuerzo pluridisciplinar se ha empeñado en resolver la estructura y la función del centro de reacción fotosintético (véase "Mecanismo molecular de la fotosíntesis", por Douglas C. Youvan y Barry L. Marrs, en este mismo número).

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.º J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado
por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Hank Iken

Página	Fuente
16	James Kilkelly
17-24	Carol Donner
27	Administración Nacional sobre el Océano y la Atmósfera
28-30	Andrew Tomko
31	Organizacion Mundial para la Alimentación y la Agricultura y NASA
32	Andrew Tomko
35	Douglas C. Youvan, Instituto de Tecnología de Massachusetts
36-37	James Kilkelly
38-40	Dana Burns
45	Jon Brenneis
46-49	George Retseck
50	George Retseck (*arriba y abajo*), James Kilkelly (*centro*)
51-52	George Retseck
54	Instituto Lunar y Planetario (por cortesía del Centro de Vuelos Espaciales Johnson)
55-57	George V. Kelvin, Science Graphics
58-59	Stepehn Self
60	Cascades Volcano Observatory, Serv. Geol. de los EE.UU.
61	Quesada/Burke, cortesía de la Biblioteca Pública de Nueva York
65	Randall W. Davis, Instituto de Investigación de los Mares del Mundo
66	Tom Prentiss
67	Warren M. Zapol
68-70	Tom Prentiss
73-74	Stephen Grohe
76-78	Gabor Kiss
79	T. Alan Egolf y J. P. Massar
80	Karl Sims
82	Leonardo Mateu
84-92	L. Mateu y Magda Mària
95-97	Thomas C. Moore
98-102	Michael Goodman

ISSN 0210-136X — Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por
Reprostudy, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

MORTIMER MISHKIN y TIM APPENZELLER ("Anatomía de la memoria") son, respectivamente, jefe del laboratorio de neuropsicología del Instituto Nacional estadounidense de la Salud Mental (NIMH) y redactor de SCIENTIFIC AMERICAN. Mishkin ha dedicado su carrera entera al análisis de los mecanismos cerebrales del comportamiento complejo. Se formó en el Darmouth College y la Universidad de McGill, por la que se recibió de doctor en 1951. Se trasladó luego al Institute of Living, de Hartford, Connecticut, donde participó en la creación de un laboratorio dedicado al estudio neurológico del comportamiento de los primates. En 1955 se incorporó a la sección de neuropsicología del NIMH. En 1980 fue nombrado jefe de lo que actualmente constituye un excelente laboratorio de neurofisiología. Mishkin preside la Sociedad de Neurología.

MICHAEL H. GLANTZ ("Sequía en Africa") dirige el Grupo de Impactos Ambientales y Sociales del Centro Nacional estadounidense de Estudios Atmosféricos (NCAR). Licenciado en ingeniería metalúrgica por la Universidad de Pennsylvania (1961), después de trabajar durante varios años para la industria regresó a esa institución para doctorarse en ciencias políticas, en 1970. En 1974 ingresó en el NCAR en calidad de becario de postdoctorado.

DOUGLAS C. YOUVAN y BARRY L. MARRS ("Mecanismo molecular de la fotosíntesis") han descubierto y caracterizado la primera agrupación conocida de genes que codifican la información necesaria para llevar a cabo la fase inicial de la fotosíntesis. Youvan enseña biología aplicada en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y Marrs es director de investigación microbiológica de E. I. du Pont de Nemours & Co., Ltd. Youvan se doctoró en biofísica por la Universidad de California en Berkeley; en 1981, a raíz de su asistencia a un seminario que impartió Marrs en el Laboratorio Melvin Calvin, de Berkeley, se sintió interesado por la fotosíntesis bacteriana. Ambos investigadores prosiguieron su colaboración en el Laboratorio de Cold Spring Harbor y, después, en el MIT. Marrs, licenciado por el Williams College y doctor por la Universidad Case Western Reserve, enseñó bioquímica en la Facultad de Medicina de la Universidad de San Luis e investigó para la Exxon Research and Engineering Company. Marrs ingresó en du Pont en 1985.

ANDREW D. JEFFRIES, PETER R. SAULSON, ROBERT E. SPERO y MICHAEL E. ZUCKER ("Observatorios de ondas gravitatorias") comparten un mismo interés por los fenómenos esquivos del cosmos. Jeffries es físico experimental del Centro de Investigación Espacial del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Se licenció en física por la Universidad de California en Berkeley (1977) y se doctoró por el MIT (1983). Saulson es investigador de número del departamento de física del MIT. Tras su graduación por el Harvard College, en 1976, se trasladó a la Universidad de Princeton, por la que se recibió de doctor defendiendo un trabajo sobre la materia oscura de las galaxias espirales. Spero, miembro del equipo investigador del Instituto de Tecnología de California (Caltech), estudió física en la Universidad de California en Los Angeles y la Universidad de California en Irvine, que le otorgó el doctorado en 1979. En el Caltech, al que se incorporó en 1980, desarrolló un método interferométrico de medición de corrimientos extremadamente pequeños, logro decisivo para la detección de ondas gravitatorias. Zucker, que cursó la licenciatura en la Universidad de Rochester, trabaja en el Caltech sobre su tesis de doctorado.

PETER FRANCIS y STEPHEN SELF ("Hundimiento de los volcanes") han hecho mucho camino juntos. Ambos proceden de naciones de la Commonwealth (Francis de Zambia y Self de Inglaterra), cursaron estudios en el Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología de Londres, son geólogos a los que atraen los efectos climáticos de las erupciones volcánicas y en la actualidad trabajan en Texas. Francis, licenciado y doctor por el Imperial, es miembro del departamento de ciencias terrestres de la Universiad inglesa a Distancia e investigador visitante del Instituto Lunar y Planetario de Houston. Self se licenció por la Universidad de Leeds y se doctoró por el Colegio Imperial. En la actualidad es profesor asociado de la Universidad de Texas en Arlington.

WARREN M. ZAPOL ("Adaptaciones al buceo de la foca de Weddel") es neoyorquino y supo por primera vez de los mamíferos marinos en el parque zoológico del Bronx. Estudió biología en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, licenciándose en medicina por la facultad correspondiente de la Universidad de Rochester. Hoy enseña anestesia en la Facultad de Medicina de Harvard y en el Hospital General de Massachusetts, y reparte su tiempo entre las ocupaciones clínicas (anestesia de cirugía del tórax y respiratoria y cuidados intensivos respiratorios de pacientes afectados de lesiones pulmonares agudas) y, sobre todo, la investigación (dirige un centro especializado en la investigación de la insuficiencia respiratoria en adultos montado en aquella institución por los Institutos Nacionales de la Salud).

W. DANIEL HILLIS ("La máquina de conexión") es científico fundador de la Thinking Machines Corporation, de Cambridge (Massachusetts), así como arquitecto del sistema de la máquina de conexión. Se formó en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, por el que se licenció en 1978. En 1985, su tesis de doctorado, que desarrolló en el laboratorio de inteligencia artificial del MIT, mereció el premio extraordinario que concede la ACM. Hillis es autor de *The Connection Machine* y de numerosos artículos sobre robótica, inteligencia artificial y arquitectura de sistemas.

LEONARDO MATEU ("La mielina"), natural de Denia, se trasladó de niño a Venezuela. Tras licenciarse en biología por la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC) le otorga una beca para continuar sus estudios de postgrado en el extranjero. Viaja a París donde reside por cuatro años y bajo la dirección del profesor Vittorio Luzzati obtiene el doctorado de estado en la Universidad de París VII, con mención Muy Honorable. A su regreso al IVIC en Caracas, funda el laboratorio de estructura molecular. Ha sido director del Centro de Biofísica y Bioquímica y decano de la Escuela Multidisciplinaria de Postgrado del IVIC. En 1982 y en 1984 se le otorgó el Premio Nacional de Desarrollo Tecnológico de Venezuela, por varios desarrollos de instrumental científico. Entre éstos, figura un sistema para efectuar análisis cristalográficos rápidos (en segundos) de cálculos renales de muy pequeño tamaño (menores de 1 miligramo de peso). Es miembro de la Academia de Ciencias de América Latina.

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos años

Falleció en Lisboa Alonso Rodríguez de Guevara, principal figura española de la oposición desde el galenismo a la renovación vesaliana del saber anatómico.

La crítica de la obra de Vesalio que realizó Rodríguez de Guevara puede considerarse como el contrapunto del movimiento vesaliano español, encabezado en la Universidad de Valencia por Pedro Jimeno y Luis Collado. A pesar de su notable interés, se trata de un autor particularmente mal conocido, tanto por los estudiosos de la influencia de Vesalio como por los historiadores españoles. Los primeros no lo han tenido en cuenta al ocuparse de la reacción antivesaliana. Los segundos se han limitado a manejar la traducción castellana del prólogo de su libro que Hernández Morejón incluyó en su clásica historia de la medicina española, afirmando sobre esta única base que fue el fundador, en la Universidad de Valladolid, de la primera cátedra española de anatomía. Unicamente varios autores portugueses han analizado su libro y dado a conocer los principales hechos de su biografía.

Rodríguez de Guevara nació en Granada en el primer tercio del siglo XVI. De su formación científica solamente sabemos con seguridad que residió dos años en Italia y que estudió allí, quizá con Realdo Colombo, en una de las universidades en las que se daba enseñanza práctica de la anatomía. A su regreso a España, en una fecha comprendida entre 1548 y 1550, dio durante veinte meses un curso anatómico en la Universidad de Valladolid. Fue la primera vez que en la Corona de Castilla se enseñó anatomía sobre el cadáver, lo que explica en gran parte el extraordinario éxito que el curso alcanzó entre los profesores de dicha universidad y los principales médicos de la corte. Cuando dio este curso tenía solamente el título de cirujano. El grado de licenciado en medicina lo recibió en 1552, pero no en la Universidad de Valladolid ni en otra de las importantes existentes entonces en España, sino en la de Sigüenza, prototipo de centro universitario "silvestre" que vendía títulos en condiciones poco escrupulosas.

¿Por qué un hombre tan bien relacionado y que había tenido tanto éxito tuvo que recurrir a un grado de Sigüenza? Allí recibió el título también el gran médico judío portugués Zacuto Lusitano. ¿Tenía Rodríguez de Guevara problemas con la "limpieza de la sangre"? No lo sabemos, aunque su biografía posterior encaja con la trayectoria novelesca a la que se vieron forzados muchos conversos ibéricos de la época. Tampoco está clara la cuestión de la enseñanza anatómica que impartió en Valladolid. ¿Fue solamente un curso aislado o llegó a crearse la cátedra como el propio Guevara afirma? En cualquier caso, dicha enseñanza no tuvo continuidad, hasta el punto de que, durante la segunda mitad del siglo XVI, Valladolid fue la única de las universidades españolas importantes que no contó con una cátedra de anatomía.

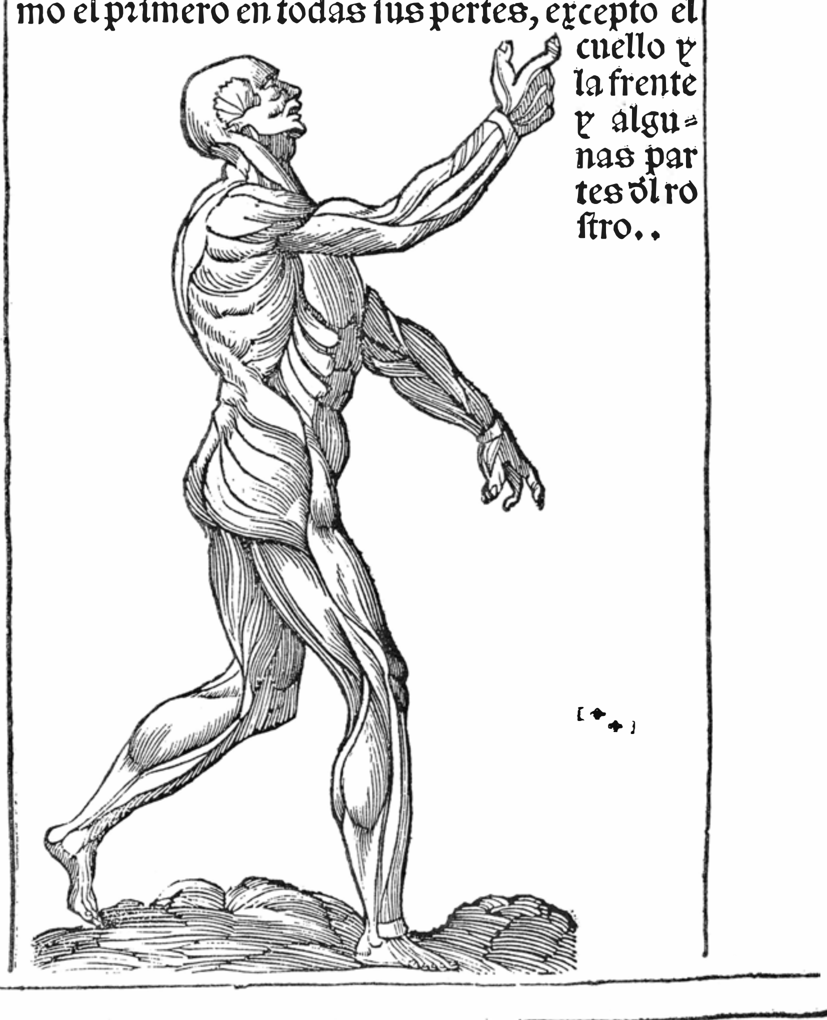
En 1556, al parecer por indicación del propio Felipe II, Rodríguez de Guevara se trasladó a Portugal como médico de cámara de Catalina, esposa de Juan III y tía del monarca español. Pronto fue nombrado titular de "una cadeira de Medicina juntamente a la de Anatomía" en la Universidad de Coimbra. A pesar de las disposiciones que lo prohibían, residió en Lisboa, en cuyo Hospital de Todos-os-Santos organizó también la enseñanza de anatomía y cirugía. En Portugal se había practicado con anterioridad la disección de cadáveres humanos y en los *Privilegios* de la Universidad de Coimbra se incluye un mandamiento de 1546 en el que se ordena entregar cadáveres para "fazer anathomia". No obstante, corresponde a Rodríguez de Guevara el mérito de haber iniciado en su país adoptivo la enseñanza práctica regular de la disciplina. Por lo demás, su personalidad no fue precisamente la de una figura serenamente consagrada a la ciencia. Aparte de sus turbios manejos para ocupar también una nueva cátedra de cirugía, que redondeó de forma notable sus ingresos como docente, hay que subrayar su destacada actividad en el terreno de las intrigas políticas. Dicha actividad culminó en el período siguiente a la muerte del rey Sebastián. Los historiadores portugueses han demostrado documentalmente, en efecto, que el médico español fue el "mejor espía" que tuvo Felipe II en la corte de Lisboa en las fechas anteriores a la incorporación de Portugal a la corona hispana.

En 1559, a los tres años por tanto de su llegada a Portugal, Rodríguez de Guevara publicó en Coimbra un libro titulado *In pluribus ex iis quibus Galenus impugnatur ab Andrea Vesalio Bruxelensi in constructione et usu partium corporis humani, defensio*. No es un tratado sistemático de anatomía, sino la discusión de treinta y tantos problemas anatómicos con la intención de revisar las opiniones contrapuestas de Galeno y de Vesalio. Tal como lo indica el título, se trata fundamentalmente de una "defensio" del primero. No obstante, Guevara no adopta una posición agresiva y cerrada como la de Silvio. Su tono intenta ser de imparcialidad objetiva: en principio, ambos autores tienen aciertos y errores. La obra se inicia con un capítulo que reconoce "algunos levísimos errores de Galeno acerca de los huesos" y más tarde llega incluso a elogiar a Vesalio en algún caso aislado, como, por ejemplo, al hablar de los músculos linguales. Pero todo ello no es más que un pequeño

contrapeso de la denuncia continua de los errores de Vesalio sobre la anatomía del oído, del ojo, de los nervios, de diversos músculos, de los vasos, del órgano olfatorio o acerca de cuestiones terminológicas. Rodríguez de Guevara, sin la obcecación y el resentimiento de Silvio, fue sin duda un convencido galenista en morfología. El ambiente portugués en el que se escribió el libro lo recibió, en boca de su censor, como "eruditísimos trabajos en muchos de cuyos lugares defiende a Galeno". No cabe duda de que esa fue la intención del médico español. El tono tácticamente imparcial no justifica en absoluto la hipótesis de Barbosa que, impresionado por la turbia personalidad política de Guevara, llega a suponer que disimuló sus auténticas ideas científicas para halagar el galenismo dominante en el ambiente médico portugués.

Al enumerar las personalidades que asistieron al curso de anatomía que dio hacia 1550 en la Universidad de Valladolid, Alonso Rodríguez de Guevara se refiere a "Montaña que, a pesar de que tenía ya setenta años, padecía una rebeldísima gota y, coronado de innumerables laureles médicos, era ajeno a toda vanidad, asistió a todas mis lecciones sin perder una, haciéndose llevar al efecto en una silla de manos". Se trata de Bernardino Montaña de Monserrate, médico de la casa real desde 1537 y autor de una obra titulada *Libro de la Anathomia del hombre*. Formado en alguna universidad extranjera, declara que volvió a España en 1513 y que había comenzado a ejercer la profesión en 1506.

Montaña publicó su libro en Valladolid en el año 1551, no siendo muy aventurado presumir que bajo la influencia del curso que acababa de recibir de Rodríguez de Guevara, al que alude en el "Prohemio". Consta de dos partes independientes. La primera ("De la anathomia del cuerpo humano") es la propiamente morfológica. El título de la obra, al estar escrita en castellano, y el desconocimiento de otras fuentes son las únicas razones que justifican la desmesurada importancia que habitualmente se le ha concedido en el panorama de la anatomía española del siglo XVI. Es un pedestre resumen que refleja una asimilación libresca de los supuestos galénicos tradicionales. Ni un solo detalle, ni siquiera terminológico, corresponde a los nuevos rumbos anatómicos que en dicha fecha estaba imponiendo el movimiento vesaliano. No cita a Vesalio, lo que no impide la inclusión al final del


De la Anothomia. Fo. cxxx.

¶ Por esta figura se muestrã los musculos primeros q̃ están en el lado de todo el cuerpo y en los lados exteriores y interiores d las piernas y braços, d manera q̃ en la vna pierna y vn braço estan señalados los musculos interiores, y en la otra pierna y otro braço, los musculos exteriores.

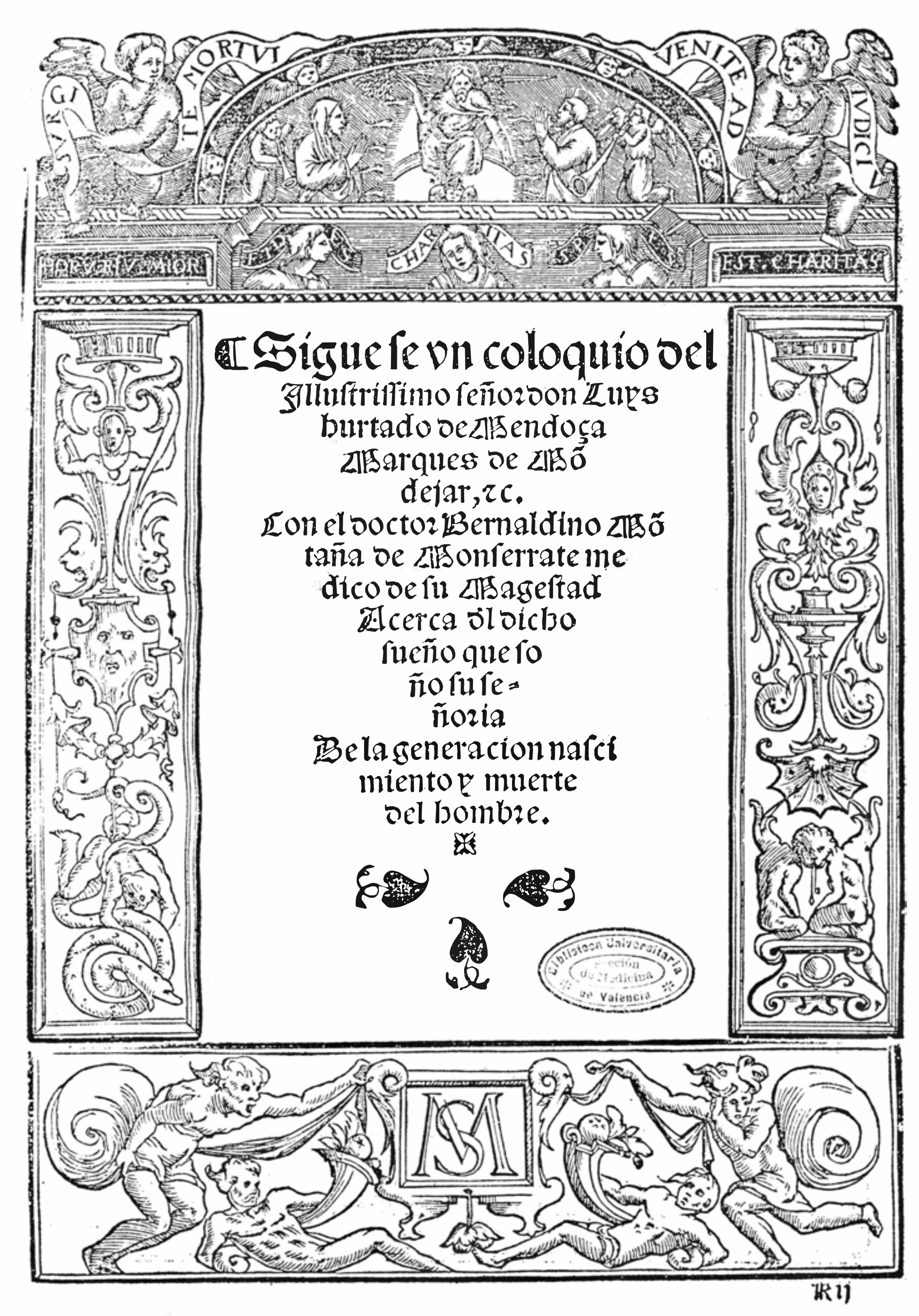
¶ Entiẽde se que esta el cuerpo dessollado como el primero en todas sus pertes, excepto el cuello y la frente y algunas partes dl rostro..

K ij

1. Una de las doce figuras incluidas al final del Libro de la Anathomia del hombre *(1551), de Bernardino Montaña de Monserrate. Su importancia dentro de la historia del grabado anatómico español ha sido tradicionalmente sobrevalorada, principalmente por desconocimiento de otras fuentes. En realidad, se trata de copias muy toscas de ilustraciones de la* Fabrica, *de Vesalio*

libro de doce figuras copiadas de la *Fabrica*, pero tan toscamente, que son caricaturas de los originales.

La segunda parte de la obra ("Sueño del marqués de Mondéjar") tiene, por el contrario, un innegable interés. El tema de la "generación, nascimiento y muerte del hombre" es para Montaña algo más vivo que las nociones anatómicas que ha expuesto antes. Se muestra muy celoso de separar la metafísica de la medicina y también de dotar a ésta de un sólido fundamento empírico. La especulación puede llegar en algún caso a cosas que son verdad, "mas en cuanto al médico son como si no fuesen, porque son cosas que no pueden alcanzarse por los sentidos, y el mé-



Sigue se vn coloquio del Illustrissimo señor don Luys hurtado de Mendoça Marques de Mondejar, &c. Con el doctor Bernaldino Montaña de Monserrate medico de su Magestad Acerca dl dicho sueño que soño su señoria De la generacion nascimiento y muerte del hombre.

2. Portada del "Sueño del marqués de Mondéjar", segunda parte del Libro *de Montaña de Monserrate. Dedicado a la "generación, nascimiento y muerte del hombre", su contenido tiene mayor interés que la sección anatómica de la obra, sobre todo por su orientación empírica. Llega incluso a recurrir al análisis químico de la sangre, la orina y la saliva para fundamentar las interpretaciones fisiológicas, actitud muy notable en el contexto del galenismo académico de la época*

dico… no trata de disposición ninguna del cuerpo que no pueda conocerse por los sentidos". En su búsqueda de bases empíricas, Montaña se apoya en la destilación, de la que demuestra tener sólidos conocimientos. Ya es significativo que se ocupe de la "quintaesencia del agua ardiente", cuidando de descartar el sentido mágico del término *quintaesencia*, y comparando la acción del estómago con una operación química. Pero lo más notable es que recurra al análisis químico de la sangre, de la orina y de la saliva para fundamentar unos esquemas fisiológicos, por lo demás estrictamente galénicos. "Es necesario que se destile la sangre después de apartada el agua superflua que se aparta cuando se cuaja la sangre por el frío —dice, por ejemplo— y esta destilación háse de hacer con calores diferentes, es a saber, de agua y de ceniça, con los cuales calores se hace apartamiento de sus substancias, y de otra manera no se pueden conoscer si no es adevinando."

Anatomía de la memoria

El análisis de la amnesia ha revelado cómo podrían interactuar las estructuras cerebrales profundas y las vías de la percepción, asentadas en capas exteriores, para transformar los estímulos sensoriales en recuerdos

Mortimer Mishkin y Tim Appenzeller

Pese a lo reducido de su volumen, el cerebro humano aloja un sistema de memoria tan potente que captura la imagen de un rostro al primer encuentro, tan amplio que almacena las experiencias de una vida entera y tan versátil que el recuerdo de una escena trae a colación asociaciones de imágenes visuales, sonidos, olores, sabores, sensaciones táctiles y emociones. ¿Cómo funciona ese sistema mnémico? La mera definición de la memoria constituye de por sí una ardua y debatida tarea; sugiere la introspección que no es lo mismo conocer un rostro o un poema que conocer una técnica, por ejemplo, la mecanografía. Además, el substrato físico de la memoria, los aproximadamente cien mil millones de neuronas cerebrales y sus enmarañadas interconexiones, resulta superlativamente intrincado. Empero, empeñados en un esfuerzo de esquematización, mis colegas y yo (Mishkin) estamos empezando ya a delinear cómo recuerda el cerebro.

La representación a que hemos llegado es, en gran parte, de carácter anatómico. Durante los últimos 20 años hemos identificado estructuras y "estaciones" (amplios conjuntos) neuronales implicados en la memoria; hemos reseguido sus conexiones y hemos intentado determinar cómo interactúan cuando los recuerdos se almacenan, se recobran o se vinculan a otra experiencia. Otros investigadores analizan la memoria empleando una escala más fina: en algunos de los animales menos complejos y en tejido nervioso aislado de especies superiores detectan cambios de las propiedades eléctricas y químicas de ciertas neuronas, instados por ejercicios sencillos de aprendizaje. La complejidad de nuestro objeto, la memoria humana o el cerebro de los monos del Viejo Mundo, como aproximación óptima, requiere un planteamiento inicial diferente, que insista en la arquitectura general. Por supuesto, en última instancia la memoria es una serie de episodios moleculares. Nuestro empeño consiste en cartografiar el territorio donde tienen lugar esos episodios.

Muchos de los estudios que han propiciado la descripción actual derivaron de historias clínicas de pacientes que, por enfermedad, lesión o intervención quirúrgica que afectaban áreas específicas de su cerebro, habían perdido parte de su capacidad de aprender o de recordar. Quizás el más famoso de esos casos sea el de un paciente de amnesia profunda conocido por las iniciales H. M. Estudiado por Brenda Milner, del Instituto Neurológico de Montreal, y por sus colegas, de otras instituciones, el caso de H. M. ha proporcionado abundante información sobre el tipo de deterioro asociado a una determinada clase de lesión cerebral.

Los trabajos experimentales, efectuados la mayoría de ellos en macacos, han combinado investigaciones anatómicas, fisiológicas y de la conducta. Resiguiendo el transporte de trazadores a lo largo de los axones, las sutilísimas prolongaciones de que se sirven las neuronas para transmitir señales, se han revelado los complejos circuitos nerviosos que permitirían a ciertas estructuras desempeñar algún papel en la memoria. Las mediciones de la actividad eléctrica de las neuronas, o de su captación de glucosa radiactiva, han permitido distinguir qué partes del cerebro actúan durante las tareas relacionadas con el aprendizaje. En la última fase del experimento, diseñada para evaluar la importancia funcional de estructuras identificadas por otros medios, se ha combinado la cirugía o la administración de drogas con pruebas psicológicas. Mediante drogas se destruyen o bloquean las estaciones del cerebro de un animal de experimentación, o se cortan las sendas que las unen. A continuación se examina el comportamiento del animal en pruebas concebidas para distinguir los diversos componentes de la memoria y determinar cuál de ellos ha sufrido deterioro.

Para comprender la memoria humana hemos elegido un camino indirecto, con todos los inconvenientes que ello supone. El cerebro del macaco mide alrededor de la cuarta parte del propio del chimpancé, el pariente más próximo de los seres humanos; a su vez, el cerebro del chimpancé viene a ser una cuarta parte del cerebro del hombre. El aumento de tamaño va acompañado de una mayor complejidad. Todas las estructuras que encontramos en el cerebro del macaco tienen sus correspondientes réplicas en el humano, si bien sus funciones pueden haber divergido en el curso de la evolución. En particular, la capacidad, exclusivamente humana, del habla y sus concomitantes especializaciones cerebrales limitan las posibilidades del procedimiento comparativo. Ello no obstante, las estructuras generales del sistema nervioso de simios y humanos son, con probabilidad, iguales. Nuestros hallazgos resultan, en ese orden, coherentes con los datos sobre la pérdida humana de la memoria obtenidos de modo directo.

El sistema visual

La mayoría de las veces, los recuerdos se originan a modo de impresiones sensoriales. Antes de preguntarnos cómo almacena el cerebro una experiencia sensorial en forma de recuerdo, querríamos saber cómo procesa la información sensorial. De hecho, el punto de partida de nuestra investigación sobre la memoria consistió en un estudio de la vía nerviosa responsable de la percepción visual.

El sistema visual central empieza en el córtex estriado, o córtex visual primario, situado en la superficie posterior del cerebro y que, a través del ner-



1. OBJETOS VISUALMENTE DISTINTIVOS que se han empleado para someter a ensayo la memoria de los monos. El autor principal (Mishkin) y sus colegas han tratado de identificar las estructuras y vías del cerebro que capacitan a los monos para reconocer, de un par, el objeto que les resulta familiar habiéndolo visto sólo una vez. La pluralidad de objetos utilizados asegura que el individuo aprenda una muestra totalmente nueva en cada presentación.

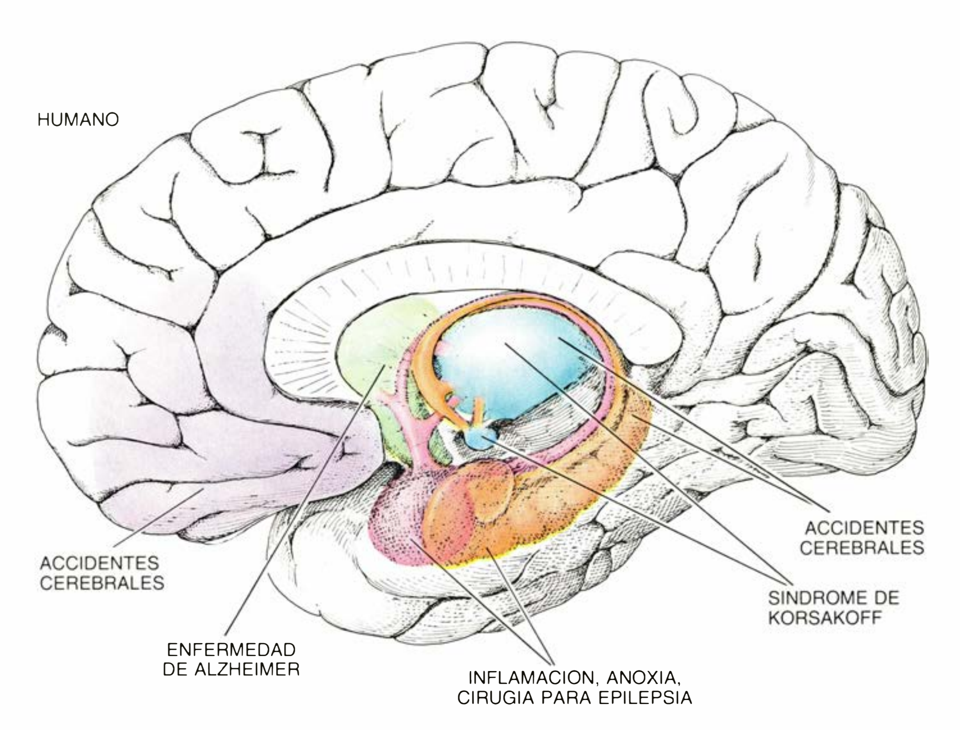
vio óptico y de una estación intermedia (el cuerpo geniculado lateral) dispuesta en el fondo del cerebro, recibe información del mundo visible desde la retina. El córtex estriado registra un mapa sistemático del campo visual: cada porción del campo activa un grupo distinto de neuronas. Pero el sistema visual no termina en el córtex estriado. En la década de 1950 se sabía ya que el lóbulo temporal, la división que, en ambos hemisferios del cerebro, queda detrás de la sien y de la oreja, también está implicado en la visión.

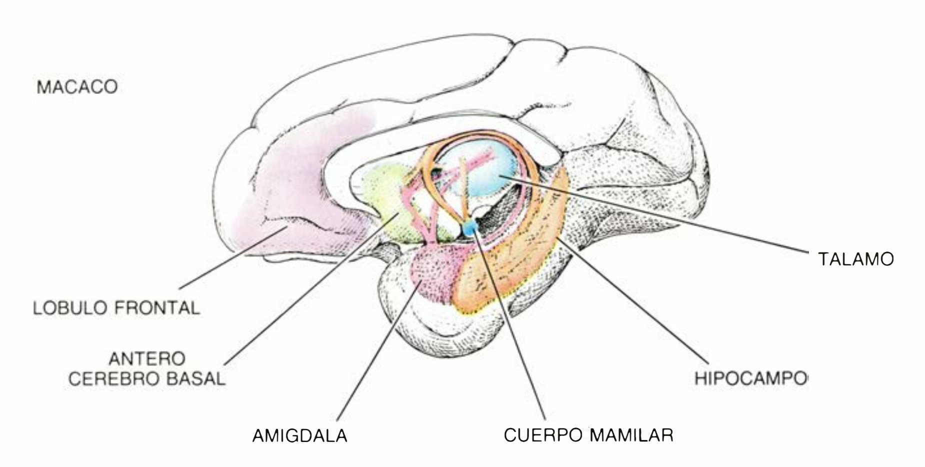
El área visual del lóbulo temporal, según otros investigadores y yo descubrimos en la década de 1960, constituye, en realidad, la continuación de una vía que parte del córtex estriado. La senda se prolonga a través del tejido cortical (estratos externos del cerebro) y se introduce en el córtex temporal inferior, empalmando allí con la subsuperficie del lóbulo temporal. Estudios neuroanatómicos evidenciaron que, a lo largo de la vía, aparecían conectadas en diversas secuencias varias estaciones corticales.

Investigadores de distintos laboratorios exploraron la contribución de algunas de esas estaciones a la percepción visual: por lesión quirúrgica de la vía en monos y sometiéndolos luego a pruebas sobre tareas visuales, así como registrando la actividad visual de cada estación en los animales expuestos a diversos estímulos visuales. En un experimento decisivo, Charles G. Gross, de la Universidad de Princeton, y sus colegas registraron las respuestas de las neuronas del córtex temporal inferior a estímulos —figurillas— que se les iban exhibiendo a los monos.

Se sabía ya que las neuronas del córtex estriado respondían con mayor intensidad ante un estímulo simple, como una breve línea orientada en un sentido determinado y que se presente en un lugar concreto del campo visual (fenómeno descubierto por David H. Hubel y Torsten N. Wiesel). Las neuronas íferotemporales examinadas por Gross y sus colegas respondían, empero, a formas más complejas, enmarcadas en un área de 20 a 30 grados de lado. Ciertas neuronas respondían incluso a una figura compleja, cualquiera que fuera su situación en el campo visual. Tales resultados parecían indicar que las neuronas íferotemporales recibían datos procedentes de amplios sectores del campo visual y, a menudo, de la constelación entera de propiedades que constituyen un estímulo visual.

Estos y otros resultados nos indujeron a postular que la información visual se procesaba secuencialmente a lo largo de la vía. Las neuronas de ésta tendrían "ventanas" abiertas al mundo visible que, en las sucesivas estaciones, irían ensanchándose progresivamente, tanto en su extensión espacial como en lo concerniente a la complejidad de la información que admitirían. Las células responderían cada vez a más propiedades físicas de los objetos —incluidos el tamaño, la forma, el color y la textura— hasta que, en las estaciones finales del córtex temporal inferior, sintetizarían una representación completa del objeto.



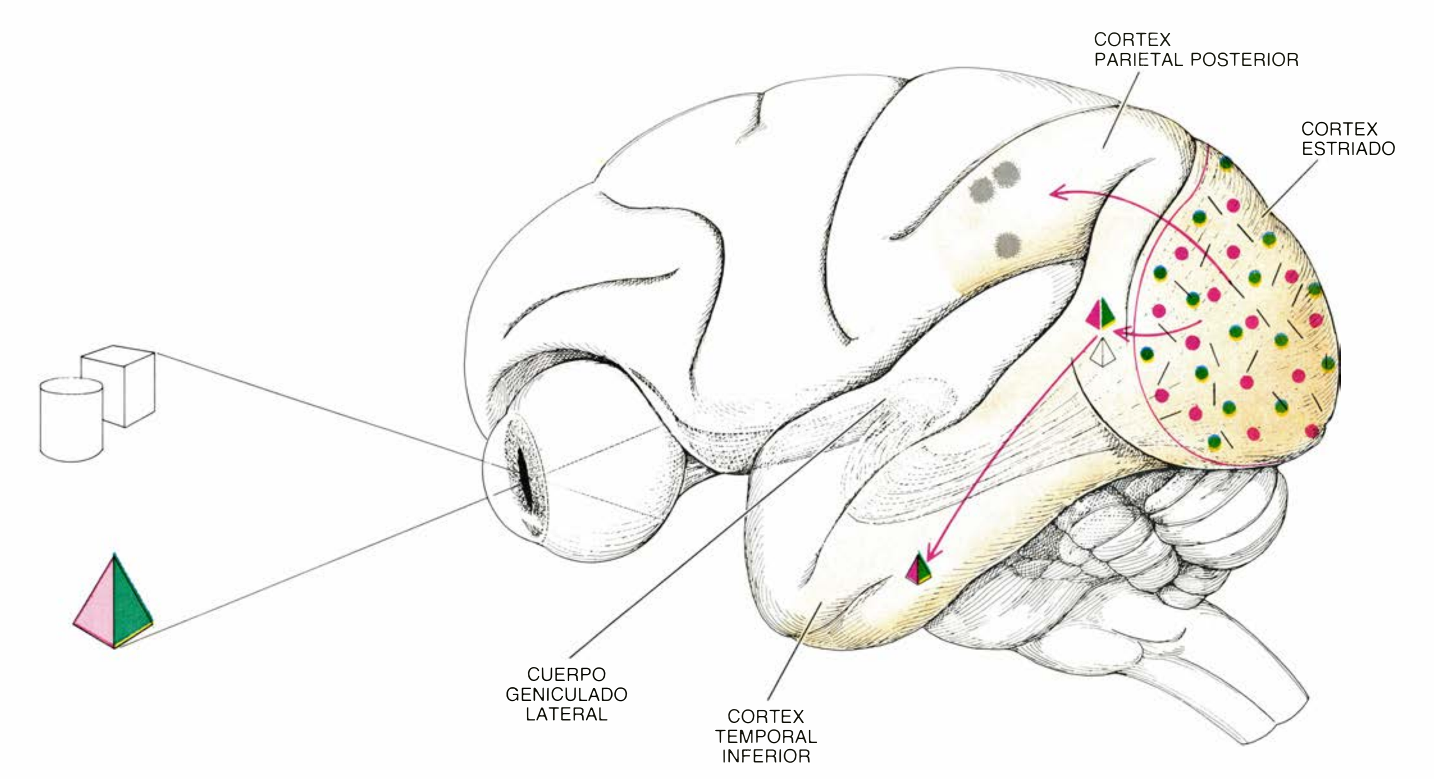


2. PUNTOS DEL CEREBRO susceptibles de deterioro por enfermedades u otros episodios que pueden producir pérdida de memoria en los seres humanos; se indican en este corte esquemático del cerebro humano (*arriba*). Las coloraciones señalan las estructuras correspondientes en el cerebro de un macaco (*abajo*).

De la experiencia a la memoria

Por tanto, a lo largo de la vía visual el cerebro integra los datos sensoriales y los convierte en una experiencia de percepción. Según parece, los datos de los demás sentidos se procesan de modo virtualmente idéntico; en nuestro laboratorio del Instituto Nacional estadounidense de la Salud Mental, David P. Friedman, Elisabeth A. Murray, Timothy P. Pons y Richard J. Schneider descubrieron hace poco una extensa vía de procesamiento de las sensaciones táctiles. En la primera estación, cada neurona respondía a un punto distinto de la superficie del cuerpo, mientras que las neuronas de la estación final respondían a estímulos producidos sobre amplias áreas y, quizás, a la experiencia táctil completa.

¿Qué otros episodios deben registrarse para que esas percepciones integradas se almacenen en forma de re-



3. EL SISTEMA VISUAL PROCESA la información a lo largo de dos vías del córtex, la capa exterior del cerebro. El procesamiento inicial de la información (que llega desde la retina pasando por el cuerpo geniculado lateral) tiene lugar al comienzo de las sendas, en el córtex estriado. Diversas neuronas responden allí a elementos simples y espacialmente limitados del campo visual: líneas limitantes y manchas de color. A lo largo de la vía inferior (que consta de gran número de canales divergentes y reconvergentes) las neuronas analizan propiedades más generales del objeto, como su forma global y su color. En el extremo de esa senda "del objeto", en el córtex temporal inferior, las neuronas son sensibles a gran variedad de propiedades y a una amplia extensión del campo visual, señal de que ahí converge la información plenamente procesada de los objetos. A lo largo de la vía cortical superior, que no ha sido estudiada con tanto detalle, se analizan las relaciones espaciales de una escena. Por ejemplo, una percepción de la posición de un objeto con respecto a otras señales del campo visual vendría a configurarse en la última estación de la vía "espacial", que está situada en el córtex parietal posterior. (Los dibujos del artículo son obra de Carol Donner.)

cuerdo? La cuestión constituye aún objeto de numerosas investigaciones, si bien ya pueden acotarse las vías cruciales. Aparecen ancladas a dos estructuras situadas en la cara interior del lóbulo temporal de ambos hemisferios cerebrales: el hipocampo, nombre griego del caballito de mar, al que evoca una de esas estructuras, y la amígdala, en griego almendra, que es a lo que se parece la otra.

Estudios de pacientes humanos habían sugerido ya que el hipocampo desempeñaba un papel de crucial importancia en la memoria. Desde la década de 1950 la ablación quirúrgica de parte del lóbulo temporal ha constituido el último recurso en el tratamiento de pacientes con graves ataques epilépticos cuyo foco se encontraba en esa zona del cerebro. En los primeros días después de la operación se desarrollaba una grave amnesia en bastantes de esos enfermos; ése había sido el origen de la tara de H. S. Destacaban dos rasgos de la pérdida de memoria: primero, que la amnesia era global y abarcaba los recuerdos de la experiencia de todos los sentidos; segundo, que era de naturaleza anterógrada, pues si bien los pacientes conservaban recuerdos almacenados algún tiempo antes de la operación quirúrgica, no podían formar otros nuevos. En todos los casos de tal pérdida de memoria la operación había dañado el hipocampo.

Sin embargo, resultó imposible reproducir en animales una pérdida global de memoria comparable por la mera extirpación del hipocampo. Por el contrario, en una serie de experimentos que se centraban en la amígdala descubrimos que ésta desempeñaba en la memoria un papel de importancia equiparable a la del hipocampo. Interesando a la vez ambas estructuras en los dos hemisferios cerebrales de monos sometidos a experimentación, obtuvimos un modelo animal de amnesia global anterógrada.

Nos movía en un principio el deseo de aclarar por qué el deterioro quirúrgico del córtex temporal inferior incapacitaba a los monos para un determinado tipo de aprendizaje visual: escoger un objeto o una forma asociados constantemente a una recompensa de comida, prefiriéndolos a otros que no reportaban recompensa alguna. Creíamos que la incapacidad resultaba del deterioro de la percepción visual, reflejo de la lesión de la estación procesadora superior del sistema visual. Lo más verosímil era, sin embargo, que el deterioro reflejara la incapacidad de asociar un estímulo con una recompensa.

Para descartar esta última posibilidad, y confirmar con ello que la torpeza de los monos cuyo córtex temporal inferior se había lesionado era de índole visual, bastaría demostrar que la asignación del valor de recompensa a un estímulo visual dependía de otra estructura, no dañada en los monos en cuestión. Colaborando con Barry Jones, a la sazón en la Universidad McMaster de Ontario, me puse a buscar estructuras anatómicamente vinculadas al sistema visual y fui comprobando si su destrucción por medios quirúrgicos afectaba a la capacidad de los monos para escoger un objeto incentivado. La amígdala y el hipocampo, que presentan amplias conexiones (indirectas algunas en el caso del hipocampo) con el córtex temporal inferior, se contaban entre las estructuras estudiadas de ese modo.

El escaso rendimiento resultante de la remoción bilateral de la amígdala parecía indicar que se trataba de la estructura responsable, en gran parte, de

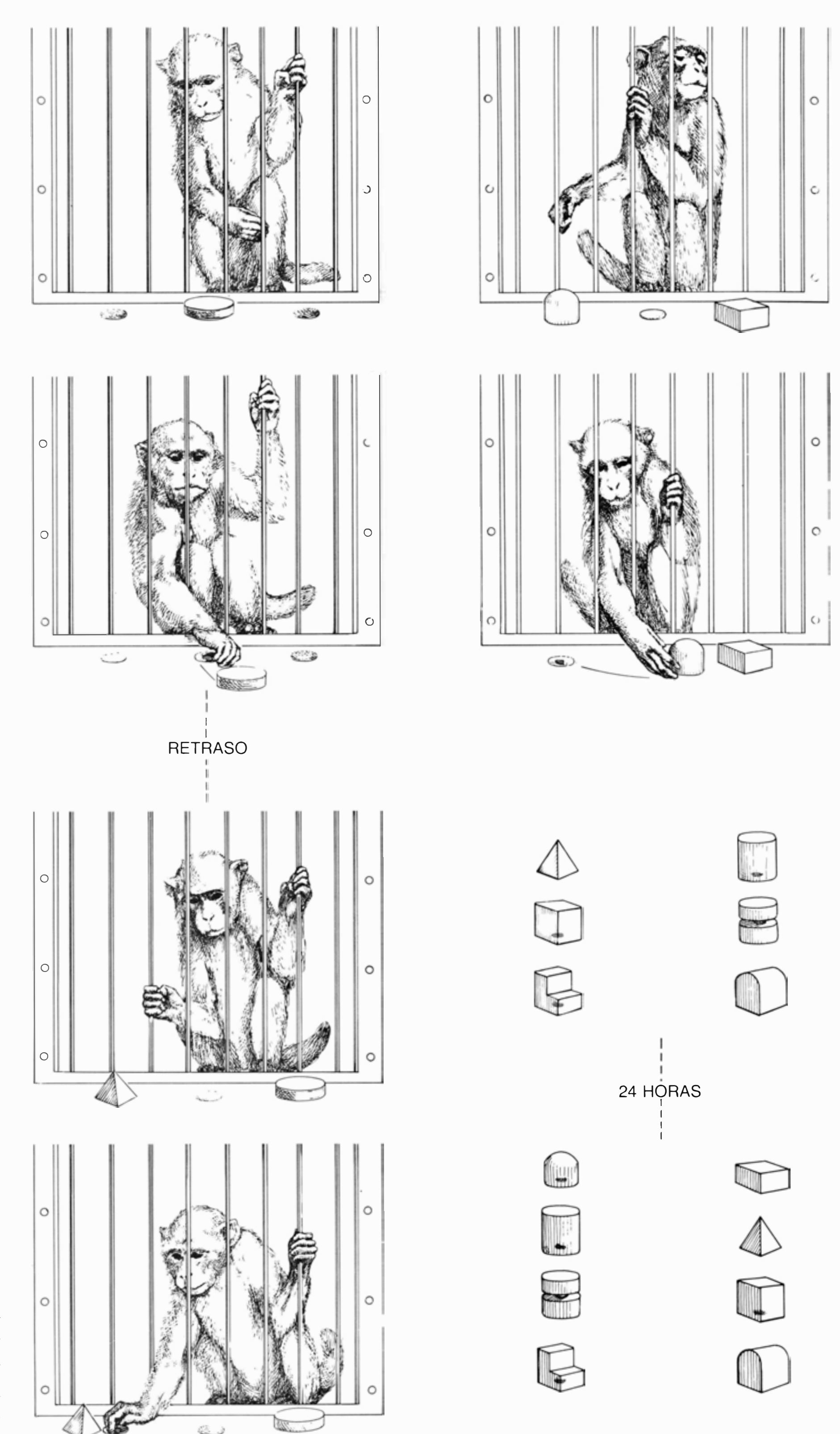
la asignación de una asociación positiva —la expectación de un bocado exquisito— a un estímulo procesado por el sistema visual. Antes de estudiar más a fondo la interacción entre el sistema visual y la amígdala, Brenda J. Spiegler, de la Universidad de Maryland en College Park, y yo buscamos un procedimiento que aumentara el deterioro. A la vez que la amígdala, incluimos en la intervención quirúrgica el hipocampo, cuya extirpación en solitario no había producido efecto.

Los animales a los que sólo se les había quitado la amígdala tardaban en aprender la asociación del estímulo con la recompensa, pero no perdían la capacidad de hacerlo. Quedamos, pues, muy sorprendidos al descubrir que la extirpación conjunta de la amígdala y el hipocampo incapacitaba por completo a los monos para efectuar dicha asociación. El espectacular aumento de la ineptitud hizo que nos preguntáramos si nos hallábamos ante un déficit que no se limitara a la incapacidad de asociar un objeto familiar con una recompensa. ¿Acaso no escogían los monos el objeto incentivado porque de una prueba a la otra lo olvidaban? ¿Habíamos creado la amnesia al destruir a la vez el hipocampo y la amígdala?

Test de memoria

Por fortuna, no hacía mucho que Jean Delacour, de la Universidad de París, y yo habíamos puesto a punto un test especialmente sensible a la memoria visual, que la distinguía de la aptitud para asociar un objeto con una recompensa. En ese test de memoria, llamado desemparejamiento diferido de muestras, se le presenta al animal un objeto distintivo, debajo del cual encuentra como recompensa un cacahuete o una rodaja de plátano. Se le ofrecen luego al mono dos objetos, el que ha visto antes y otro que le resulte extraño; pero ahora la golosina se halla oculta bajo el objeto nuevo: se le recompensa, pues, por reconocer el objeto que le es familiar y evitarlo. En cada exposición se utiliza un par de objetos totalmente nuevos.

Es esta una rutina que los monos aprenden pronto. En una adaptación de un protocolo desarrollado por David Gaffan, de Oxford, puede luego obstaculizarse la memoria visual del animal incrementando la demora entre el despliegue inicial y la elección, o dándole a recordar no un objeto sino una serie de ellos, a la que habrá de seguir una sucesión correspondiente de



4. DOS PRUEBAS DE APRENDIZAJE pueden evaluar capacidades intrínsecamente distintas. En el test, denominado de "desemparejamiento diferido de muestras" (*izquierda*), se coloca ante el simio un objeto para él desconocido. El animal, desplazándolo, encuentra debajo una recompensa. Tras un intervalo de demora, se deja ante el animal ese mismo objeto emparejado con otro nuevo. El mono reconocerá el objeto que antes había visto; mas, para obtener recompensa, habrá de mover en cambio el nuevo. Cuando ha aprendido esta tarea rutinaria, podemos hacérsela más difícil (aumentando, por ejemplo, el tiempo de dilación) con el fin de calcular su capacidad para recordar un objeto visto antes una sola vez. En otro ensayo, conocido como "de discriminación de objetos" (*derecha*), se emplea una serie de 20 pares de objetos. En cada par uno de los objetos oculta una recompensa. Se le van mostrando repetidamente cada 24 horas y en idéntica seriación los pares de objetos, hasta que aprende a escoger de manera constante el objeto incentivado de cada par. El autor principal y sus colegas han demostrado que las estructuras cerebrales son decisivas para que realice con éxito la primera tarea sin que se resienta su capacidad para aprender la segunda.

elecciones. Puesto que la golosina va siempre asociada con un objeto nuevo, la capacidad de vincular un determinado objeto a una recompensa no influye en la actuación. La recompensa sólo sirve de incentivo; el test mide específicamente la memoria de reconocimiento. Los monos normales consiguen resultados casi perfectos.

Habíamos aplicado ya ese poderoso test de reconocimiento visual a monos a los que se había extirpado el córtex temporal inferior y sabíamos que detectaba los fallos de percepción o identificación de objetos familiares que se habían observado en pruebas anteriores. Sometimos entonces a prueba animales cuyo sistema visual estaba intacto, si bien se les había resecado el hipocampo y la amígdala de los dos hemisferios. Cuando la demora entre el primer objeto y la elección era muy breve, eran capaces de realizar la tarea, señal de que no sufrían deterioro de la percepción visual. Por el contrario, cuando aumentamos a un minuto o dos la dilación, sus resultados descendían casi hasta el nivel de lo casual. Parecía, pues, que habíamos provocado una pérdida de memoria genuina.

Más aún, la amnesia resultante de la lesión conjunta del hipocampo y la amígdala no se limitaba a los estímulos visuales, sino que parecía ser global. En nuestro laboratorio Murray halló un deterioro similar en monos de experimentación valiéndose de una prueba de desemparejamiento diferido de muestras de reconocimiento táctil, esto es, que medía la capacidad de reconocer objetos por el tacto. Se creía que en pacientes humanos tal amnesia global podía resultar del deterioro del hipocampo solo; de hecho, un reciente estudio *postmortem* de un paciente amnésico, realizado por Larry R. Squire, de la Universidad de California en San Diego, y sus colegas, sólo descubrió lesiones en el hipocampo. Sin embargo, otros muchos pacientes amnésicos presentan lesiones más extensas y a su daño puede haber contribuido el deterioro de la amígdala. En efecto, un primer estudio de amnésicos sugirió que la gravedad de su pérdida de memoria podría variar en proporción a la cantidad de daño sufrido conjuntamente por la amígdala y el hipocampo.

Cuando, junto con Richard C. Saunders, examinamos en el mono la contribución de cada estructura a la memoria, hallamos precisamente ese efecto gradual. En la memoria de reconocimiento visual parecen intervenir por igual la amígdala y el hipocampo; la eliminación de una u otro influye poco, por sí sola, en la capacidad de reconocimiento del animal, por la presumible razón de que pueden sustituirse mutuamente en sus funciones. Se acentuaba mucho el deterioro cuando se resecaba una de las estructuras de ambos hemisferios y la otra de sólo uno. Tras la ablación de las dos, amígdala e hipocampo, en ambos lados, la tasa de aciertos del animal en el test de desemparejamiento de muestras diferido superaba en poco el azar.

Estaciones ulteriores

El deterioro de la amígdala y del hipocampo, dos componentes principales de lo que se conoce por sistema límbico, no es el único tipo de neuropatología capaz de provocar una amnesia global. En otros pacientes amnésicos la lesión se localiza en el diencéfalo, conjunto de núcleos del centro del cerebro organizado en forma de dos estructuras conocidas por tálamo e hipotálamo. Algunas partes del diencéfalo situadas junto a la línea media del cerebro degeneran en el síndrome de Korsakoff, una amnesia global observada en ciertos alcohólicos crónicos; la lesión del diencéfalo causada por accidentes cerebrales, traumatismos, infecciones o tumores puede dar lugar al mismo síndrome amnésico. El descubrimiento de que al diencéfalo llegan fibras procedentes del hipocampo y de la amígdala refuerza las pruebas clínicas que sugieren una participación de los núcleos diencefálicos en la memoria.

Para verificar la posibilidad de que el diencéfalo interactuara con las estructuras límbicas en una especie de circuito de la memoria, aplicamos una vez más nuestra estrategia experimental de cirugía seguida de test de comportamiento. John P. Aggleton, de la Universidad de Durham, y yo destruimos, primero en combinación y después por separado, las regiones del diencéfalo a las que envían fibras el hipocampo y la amígdala. Los tests de capacidad de reconocimiento visual revelaron el mismo patrón de fallos de la memoria que se advertía cuando se extirpaban el hipocampo y la amígdala. Dañando a la vez las terminales diencefálicas de ambas estructuras se deterioraba gravemente la memoria recognitiva de los monos, mientras que la lesión de cada terminal por separado producía sólo un efecto ligero. Al parecer, habíamos identificado dos circuitos mnémicos distintos, cada uno de los cuales bastaría para el reconocimiento visual.

Estudios ulteriores confirmaron que, más que contribuir de modo totalmente independiente a la memoria, el diencéfalo y las estructuras límbicas participan en un circuito. En nuestro laboratorio, Jocelyne H. Bachevalier y John K. Parkinson descubrieron que el corte de las conexiones que unen esas estructuras instaba un deterioro de la memoria parejo al observado cuando se dañaban las propias estructuras.

Hallazgos neuroanatómicos anteriores sugerían que no habíamos seguido los circuitos hasta su final. Los núcleos del tálamo que comunican con las estructuras límbicas envían a su vez fibras al córtex prefrontal ventromedial: un área del córtex escondida bajo el frontis del cerebro. También ahí encontró Bachevalier que las lesiones quirúrgicas causaban una profunda pérdida de memoria recognitiva.

Por tanto, la estación final del sistema visual, y de los demás sistemas sensoriales, está conectada con dos circuitos mnémicos paralelos que incluyen, como mínimo, las estructuras límbicas del lóbulo temporal, las partes mediales del diencéfalo y el córtex prefrontal ventromedial. ¿Cómo funciona el conjunto de esas estructuras en el proceso de la memoria? Viene a complicar la cuestión el hecho de que los recuerdos probablemente no se almacenen de modo exclusivo, o ni siquiera principal, en los propios circuitos. La observación clínica de que, en los humanos, la lesión del sistema límbico deja intactos y accesibles recuerdos antiguos significa que deben almacenarse también en alguna estación anterior de las vías nerviosas que hemos descrito. Los depósitos más probables de la memoria son, en efecto, las áreas del córtex donde toman forma las impresiones sensoriales.

Los circuitos mnémicos subcorticales deben, por tanto, entrar en juego con el córtex en una suerte de retroalimentación. En cuanto un estímulo sensorial procesado activa la amígdala y el hipocampo, los circuitos mnémicos han de reproducir, a su vez, esa activación sobre el área sensorial. Tal retroalimentación presumiblemente refuerce, y con ello quizás almacene, la representación neural del episodio sensible que acaba de producirse. Es probable que la representación nerviosa adquiera la forma de una agrupación de muchas neuronas, interconectadas de un modo determinado. Consecuencia de la retroalimentación debida a los circuitos mnémicos, las sinapsis de la agrupación neuronal (las uniones entre

células nerviosas) sufrirían cambios en los que se mantendría el diagrama de conexiones y se transformaría la percepción en un recuerdo duradero. El reconocimiento se produciría más tarde, al reactivarse esa agrupación neuronal ante el mismo episodio sensible que la originó.

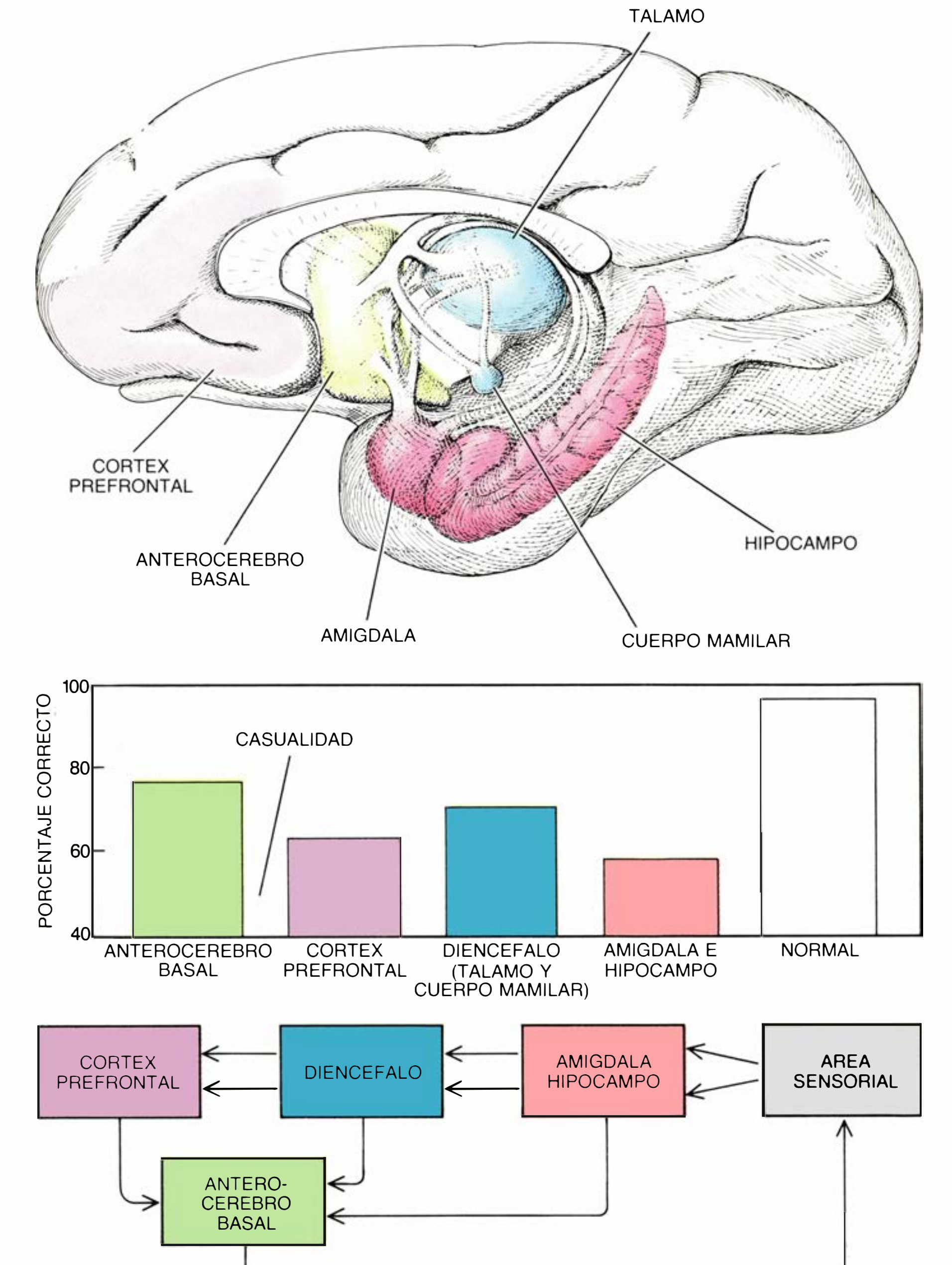
Se ignora cuál sea la contribución exacta de cada estructura de los circuitos mnémicos a dicha retroalimentación. Pero acerca de su naturaleza global sí se dispone de algunas claves. Una de ellas consiste en otra estructura más, que, según ha descubierto nuestra investigación, está implicada en la memoria recognitiva. Se trata del sistema colinérgico situado en la base del cerebro anterior, una agrupación de neuronas que proporcionan al córtex y al sistema límbico su principal ingreso de acetilcolina, un neurotransmisor o mensajero químico que lleva señales a través de las sinapsis.

Acetilcolina

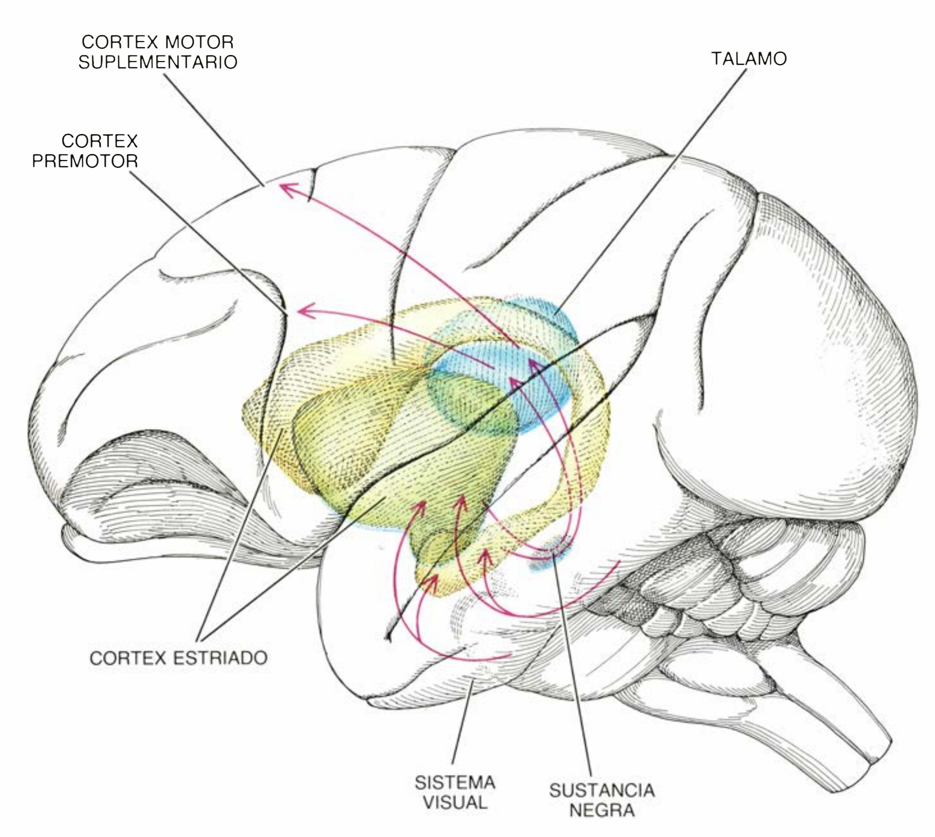
Según parece, la acetilcolina desempeña un papel vital en la memoria. Por ejemplo, en la enfermedad de Alzheimer, una de cuyas características es la pérdida de memoria, sus niveles bajan notablemente. Más aún, Thomas G. Aigner ha descubierto, en nuestro laboratorio, que los monos logran resultados superiores a los normales en el test de memoria recognitiva visual cuando se les da fisostigmina, una droga que intensifica la acción de la acetilcolina. Por el contrario, si se les administra escopolamina, sustancia que bloquea la acción del neurotransmisor, sus resultados empeoran. Recientemente, en colaboración con un equipo de investigadores encabezado por Donald L. Price y Mahlon R. De Long, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, Aigner y yo comprobamos también que la lesión de la base del cerebro anterior menoscababa en los monos la memoria recognitiva, si bien el efecto observado hasta ahora no es tan grave o tan duradero como los que resultan de lesionar las otras estructuras estudiadas.

Se dispone, sin duda, de los circuitos que capacitarían a las otras estructuras para incluir el cerebro anterior basal en la formación de recuerdos. Por ejemplo, el hipocampo y la amígdala presentan extensas proyecciones hasta el cerebro anterior basal que, a su vez, no sólo remite fibras cargadas de acetilcolina a las estructuras límbicas, sino también al córtex. En un plausible escenario para la formación de los recuerdos, la activación de los circuitos mnémicos subcorticales por parte de un estímulo sensorial dispararía la descarga de acetilcolina desde el cerebro anterior basal hasta el área sensorial. La acetilcolina (y probablemente otros neurotransmisores cuya descarga se dispara del mismo modo) iniciaría una serie de pasos celulares que modificarían la sinapsis del tejido sensorial, reforzando las conexiones nerviosas y transformando la percepción sensible en una huella mnémica física.

Los resultados de un reciente estudio bioquímico sugieren la posible actuación de un mecanismo modificador de las sinapsis en el área que, a nuestro



5. SISTEMA MNEMICO, que se ha cartografiado en su mayor parte por medio de un ensayo que mide la memoria recognitiva visual en los monos (*véase la columna izquierda de la figura 4*) tras haberles interesado quirúrgicamente estructuras o vías cerebrales específicas. El diagrama superior indica las estructuras que demostraron resultar de importancia decisiva. El gráfico central recoge los resultados promedios conseguidos por los monos en el ensayo, tras habérseles dañado quirúrgicamente elementos específicos del sistema; por mor de comparación se muestran también los resultados, casi perfectos, logrados por los individuos normales. El gráfico inferior (basado en varios datos, incluidos estudios neuroanatómicos de las conexiones que vinculan a las estructuras) ilustra cómo podrían interactuar las estructuras en la formación de la memoria. Una percepción formada en la estación final de un sistema sensorial cortical activa dos circuitos paralelos; ambos abarcan partes del diencéfalo y del córtex prefrontal. A su vez, una y otra estructura envían señales a la porción basal del cerebro anterior. Por medio de sus numerosas conexiones con el córtex, el anterocerebro basal podría cerrar el circuito. Tal vez precipite cambios en neuronas correspondientes al área sensorial, que pudieran hacer que la percepción se fuera almacenando en ella en forma de recuerdo.



6. FORMACION DEL HABITO, o desarrollo de conexiones automáticas entre un estímulo y una respuesta, que quizá dependa del córtex estriado. Este recibe gran cantidad de conexiones de los sistemas sensoriales del córtex (tipificados aquí por una rama del sistema visual) y, a su vez, envía fibras a las estructuras cerebrales que comunican con el córtex premotor y con el córtex motor suplementario. La neuroanatomía aporta así una vía bastante directa por la cual el estímulo registrado en un área sensorial podría llevar a una respuesta motora. Se ha averiguado, en efecto, que si se lesiona el córtex estriado, o las conexiones entre éste y el córtex motor, sufren menoscabo los logros del mono en un test visual que mide la formación del hábito.

entender, constituye probablemente un sitio de almacenamiento de memoria: las estaciones terminales del sistema visual. Aryeh Routtenberg, de la Universidad del Noroeste, ha propuesto que, bajo los cambios sinápticos observados tras repetida estimulación eléctrica de ciertas neuronas, subyace la adición de un grupo fosfato a una proteína cerebral conocida como *F*1, por parte de la enzima proteoquinasa *C*. Para medir la actividad del mecanismo de fosforilación en el sistema visual real del mono, Routtenberg y su discípulo Robert B. Nelson añadieron fósforo radiactivo a tejido que mi equipo había disecado de las áreas visuales. La cantidad de indicador incorporado en *F*1 era mayor en el tejido procedente de las estaciones terminales. Lo cual quizá constituya un indicio de que ese tejido posee una especial capacidad para sufrir cambios sinápticos que podrían almacenar recuerdos.

Tipos de memoria

La arquitectura cerebral descrita hasta aquí se había revelado por su contribución a un tipo de memoria: la recognitiva, notable facultad en virtud de la cual un mono, habiendo visto o tocado una sola vez cierto objeto, puede reconocerlo muchos minutos después y evitarlo en favor de otro objeto nuevo. Por supuesto, existen tipos de memoria más complejos, algunos de los cuales pueden también someterse a ensayo en los monos. Su exploración ha sacado a la luz interesantes especializaciones de las sendas nerviosas que hemos rastreado.

Por ejemplo, al percibir un objeto, no sólo captamos sus rasgos característicos, sino también su localización respecto de otros objetos o señales. Por mera intuición parece ya que recordar una escultura sea algo muy distinto que recordar su posición sobre el suelo de un museo; también constituyen dos procesos neuroanatómicos distintos. En primer lugar, la visión espacial —la capacidad de advertir relaciones espaciales— depende de una rama del sistema visual diferente de la que se encarga de percibir las cualidades distintivas de un objeto.

En 1973, trabajando en nuestro laboratorio, Walter Pohl confirmó indicios anteriores de que el tejido del córtex parietal, próximo a la parte superior del cerebro, desempeñaba un papel visual. Demostró que su ablación instaba un deterioro visual, muy distinto, empero, de la alteración subsiguiente a la lesión del córtex temporal inferior. A diferencia de los monos que sufrían lesiones ínferotemporalmente, los animales con lesión parietal podían aún discernir objetos distintivos, pero no podían percibir relaciones espaciales.

Pohl obtuvo sus pruebas en un ensayo en el que se presentaba a los monos dos escudillas con comida, tapadas. Entre las escudillas, más próximo a una que a otra y en posición que variaba de una prueba a la siguiente, se alzaba un objeto cilíndrico. A los monos se les recompensaba por destapar la escudilla más cercana al cilindro, que contenía un cacahuete; la otra estaba vacía. La tarea les resultaba bastante fácil a los sujetos con lesiones ínferotemporales. Por el contrario, los lesionados en el córtex posteroparietal hallaban grandes dificultades para aprender a destapar la escudilla incentivada.

En otros trabajos, incluido un estudio de metabolismo obra de Kathleen A. Macko, Charlene D. Jarvis y mía, en colaboración con un equipo encabezado por Charles Kennedy y Louis Sokoloff, también del Instituto Nacional estadounidense de la Salud Mental, se confirmó que el córtex parietal posterior pertenecía al sistema visual. Inyectamos un análogo radiactivo de la glucosa y estudiamos su absorción en tareas relacionadas con la visión. Los resultados apuntaron hacia la implicación, además del córtex temporal inferior, del tejido parietal posterior.

Añádase que, en nuestro laboratorio, Leslie G. Ungerleider halló recientemente una vía anatómica que emerge del córtex estriado (primera estación visual, situada en la parte de atrás del cerebro), además de la que, según sabíamos ya, estaba dedicada a procesar las características visuales de un objeto. En vez de avanzar e introducirse en el córtex temporal inferior, esa segunda senda corre hacia arriba, a través de una serie de estaciones, hasta una final situada en el córtex parietal posterior. Probablemente las relaciones espaciales se analicen a lo largo de esta vía; desde su estación final, las percepciones espaciales procesadas activan, se presume, el sistema mnémico subcortical.

Los dos circuitos mnémicos antes esbozados tal vez desempeñen funciones diferentes en el aprendizaje espacial.

Aunque el hipocampo y la amígdala pueden sustituirse recíprocamente en el aprendizaje del reconocimiento de un objeto, la primera de esas estructuras parece adquirir especial importancia en el aprendizaje de las relaciones espaciales. Estimulado por el trabajo de otros investigadores, cuyos resultados habían sugerido la trascendencia del hipocampo en el aprendizaje espacial en roedores, Parkinson exploró su papel en los monos.

Entrenó a monos normales en el desempeño de un ensayo que ponía a prueba su memoria para la localización de objetos. Se les mostraba, cada vez, dos objetos completamente nuevos, colocados en puntos específicos de la superficie de pruebas; a continuación veían uno de los objetos originales en su posición original y un duplicado exacto donde estaba antes el otro objeto o en una posición distinta. Se les recompensaba por escoger el objeto original en su posición original.

Tras resecarles las amígdalas de ambos hemisferios, los animales reaprendieron rápidamente la tarea y la efectuaron con acierto. En cambio, la ablación bilateral del hipocampo los incapacitaba para acometer la tarea. Mary Lou Smith, del Instituto Neurológico de Montreal, colaborando con Milner, informaba hace poco de un hallazgo paralelo en amnésicos humanos: una correlación entre la extensión del deterioro hipocámpico y el grado de deficiencia de la rememoración de las localizaciones de objetos.

Dónde se reúnen los recuerdos

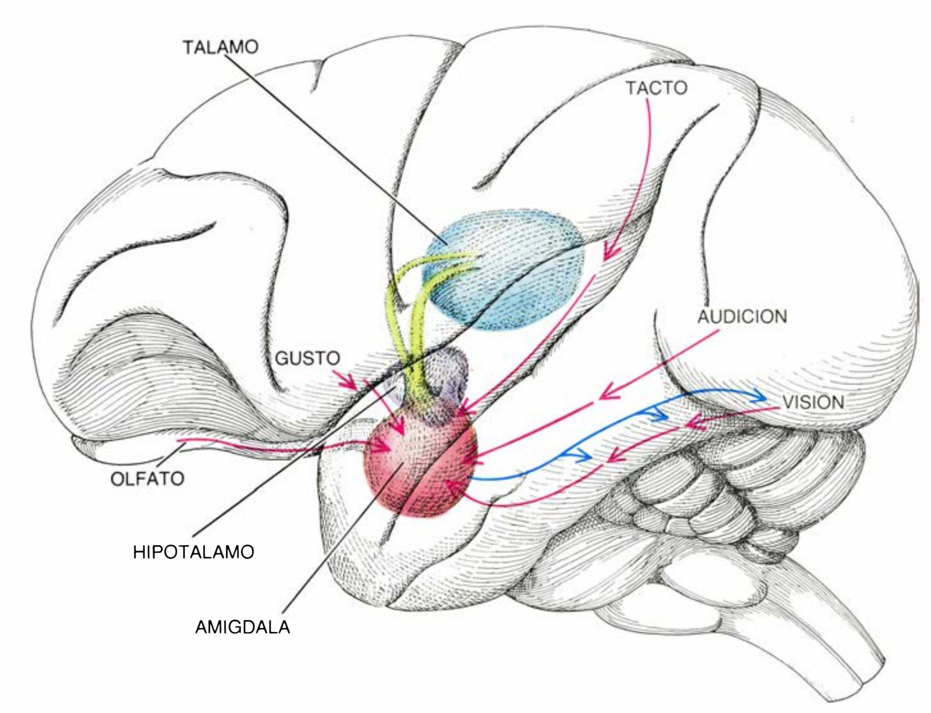
También la amígdala tiene especializaciones. Muchas de las contribuciones a la memoria características de la amígdala las sugirió su singular neuroanatomía, conocida desde mucho antes de que se supiera su función en la memoria. La amígdala —o, para ser más precisos, el complejo amigdaloide, que consta de varios núcleos— es una especie de encrucijada del cerebro. Muchos investigadores, entre ellos Blair H. Turner, de la Facultad de Medicina de la Universidad Howard, y yo mismo, hemos demostrado que la amígdala establece conexiones directas y amplias con todos los sistemas sensoriales del córtex. Se comunica también con el tálamo, a lo largo de una vía que es un segmento del sistema mnémico. Finalmente, las partes de la amígdala donde convergen las entradas sensoriales envían fibras que se hunden en las profundidades del cerebro, hasta el hipotálamo, que, según se cree, es la fuente de las respuestas emotivas.

El número y la variedad de las conexiones que se advierten entre las áreas sensoriales y la amígdala nos indujeron a Murray y a mí a preguntarnos si habría que atribuir a ésta la asociación de los recuerdos formados en los diferentes sentidos. Antes de ocuparnos de la cuestión habíamos siempre investigado el aprendizaje según se manifiesta en el reconocimiento, esto es, como una respuesta a la originaria experiencia visual, táctil o espacial.

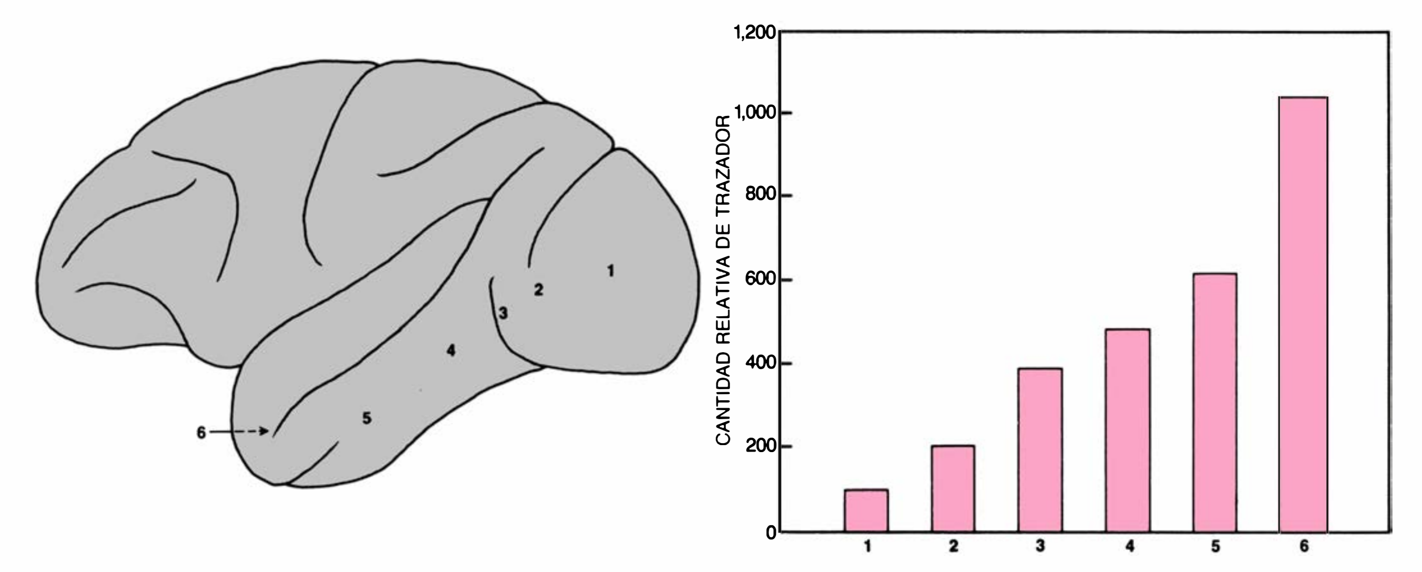
Muy a menudo, sin embargo, lo que despierta un recuerdo es una experiencia sensorial de diferente clase. El sonido de una voz familiar por teléfono evoca un recuerdo visual del rostro de quien nos llama; la vista de una ciruela morada nos trae a las mientes su sabor. Diríase que para semejante cruzamiento de llamadas fuera necesario algún tipo de intercambio entre las áreas corticales en que se almacenan los recuerdos correspondientes a cada sentido. ¿Actúa ahí de intermediario la amígdala?

Para verificar tal posibilidad, Murray y yo combinamos versiones visuales y táctiles del test de memoria recognitiva. Enseñamos a unos monos a hacer desemparejamientos de muestras diferidos con objetos escogidos de un conjunto de 40, cada uno de ellos dotado de rasgos visuales y táctiles distintivos. Los animales desempeñaban las tareas pudiendo ver los objetos y también a oscuras, circunstancia ésta en la que, para distinguir entre el objeto muestra y el nuevamente presentado, tenían que fiarse de su sentido del tacto. Después de la extracción bilateral de la amígdala efectuaban la tarea con destreza pareja a la que exhibían antes de la operación quirúrgica. Su memoria recognitiva visual y táctil había permanecido en gran parte intacta, de acuerdo con nuestro anterior hallazgo de que el hipocampo y la amígdala podían sustituirse recíprocamente como mediadores de la memoria recognitiva.

Una vez estuvieron los monos enteramente familiarizados con las cualidades visuales y táctiles de los 40 objetos, cambiamos la naturaleza del ensayo. En cada prueba, el sujeto examinaba primero un objeto a oscuras, al tacto, confrontando luego el mismo objeto con otro, ya a la luz, y debiendo elegir entre ellos valiéndose sólo de la vista. Para reconocer el objeto que po-



7. MULTIPLES CONEXIONES de la amígdala subyacen a la variedad de funciones que, según se cree, desempeña en la memoria. Desde las estaciones terminales de los sistemas sensoriales del córtex llegan fibras a la amígdala (*flechas rojas*). Las impresiones sensoriales activan por tal medio un circuito del sistema mnémico, que depende de las conexiones (*color verde*) entre la amígdala y el tálamo (estructura del diencéfalo). Vínculos (*púrpura*) entre la amígdala y el hipotálamo, donde se originan las respuestas emocionales, parecen permitir que las experiencias se asocien con emociones. Esos mismos vínculos quizá dejen también que las emociones influyan en el aprendizaje, activando las conexiones que unen, mutuamente, la amígdala y las sendas sensoriales (*mostradas aquí, en azul, sólo para el sistema visual*). La existencia de conexiones que retornan desde las áreas sensoriales hasta la amígdala quizás explique por qué un único estímulo evoca diversos recuerdos, como ocurre cuando el olor de un manjar nos recuerda su aspecto, textura y sabor.



8. INDICIO DE UN MECANISMO MOLECULAR que acaso intervenga en el aprendizaje; alcanza su cénit en las estaciones finales de la vía visual del mono. El esquema, tomado de un estudio dirigido por Aryeh Routtenberg, de la Universidad del Noroeste, muestra las respectivas cantidades de trazador de fósforo radiactivo incorporadas en *F*1 en tejidos extraídos de distintos puntos de la vía. Routtenberg ha propuesto que la fosforilación de la proteína *F*1 por parte de la enzima proteoquinasa *C* subyace a los cambios que se registran en las sinapsis de algunas neuronas tras repetida estimulación. Puede que esos cambios figuren en el almacenamiento de datos que efectúa el cerebro. Las estaciones visuales terminales se hallarían de ese modo bioquímicamente adaptadas a la memoria.

cos segundos antes había estado tocando, el simio tenía que asociar recuerdos visuales a recuerdos táctiles. Un grupo de control, formado por animales a los que se había extirpado el hipocampo, efectuaron bien la tarea, escogiendo el objeto correcto alrededor del 90 por ciento de las veces. Por el contrario, los individuos a los que se les quitó la amígdala apenas actuaron mejor que lo hubiesen hecho al azar.

El reconocimiento de que la amígdala sirve de intermediaria en la asociación de recuerdos formados a través de diferentes sentidos quizá contribuya a esclarecer un antiguo misterio de la neuropsicología. Hará unos 50 años, Heinrich Klüver y P. C. Bucy se sintieron sorprendidos por la extraña conducta de unos monos a los que se había extirpado los lóbulos temporales. A menudo, esos simios examinaban repetida e indiscriminadamente un objeto incomestible, palpándolo, probándolo y olfateándolo como si lo encontraran extraño. Posteriormente se demostró que ese curioso efecto se seguía de la eliminación de sólo la amígdala. Nuestro resultado nos llevó a proponer que una raíz de tal comportamiento era la incapacidad de los monos para vincular diferentes clases de recuerdos. Al ver un objeto familiar no podían recordar cómo olía; tras olfatearlo seguían sin recordar su sabor.

Mezcla de recuerdos con deseos

Klüver y Bucy advirtieron otra singular característica de los monos faltos de lóbulos temporales, la cual hubo también de adscribirse después a la pérdida de la amígdala: habían perdido el miedo a los seres humanos y hasta su aversión a sensaciones normalmente tan repelentes como los pinchazos. Parecía que se hubiera cortado un nexo entre estímulos familiares y sus asociaciones emotivas. En virtud precisamente de sus conexiones con las áreas sensoriales del córtex y con los resortes que disparan la respuesta emocional, insertos en lo más profundo del cerebro, la amígdala está bien provista para proporcionar ese vínculo mediador. La posibilidad de que las experiencias sensibles adquieran su carga emocional por medio de la amígdala queda corroborada con la observación que anteriormente hicimos en el curso de nuestras investigaciones sobre la memoria: los monos sin amígdala tardan en aprender la asociación de objetos con recompensas. Les cuesta mucho rememorar las asociaciones positivas de un estímulo que les es familiar.

Puede que la amígdala, además de permitir que los episodios sensoriales desarrollen asociaciones emotivas, capacite también las emociones para que configuren la percepción y el almacenamiento de recuerdos. ¿Cómo se las arregla el cerebro para entresacar los estímulos de interés de entre el revoltijo de impresiones aportadas por los sentidos? Si las emociones influyeran sobre el procesamiento sensorial en el córtex, tal vez proporcionaran el filtro necesario, tendiendo a limitar la atención —y, por ende, el aprendizaje— a los estímulos dotados de interés emocional. La amígdala, en su calidad de estructura intermediaria entre sentidos y emociones, podría subyacer bajo tal "atención selectiva".

Existen las conexiones necesarias para otorgar a la amígdala tal función de guardabarrera. Varios equipos de investigadores han comprobado que los sistemas sensoriales del córtex, además de enviar fibras hasta la amígdala, reciben prolongaciones de ésta —que, al menos en el sistema visual, son más densas en las estaciones de procesamiento superiores. En un estudio hecho en colaboración con Candace B. Pert y otros autores, en su laboratorio del Instituto Nacional estadounidense de la Salud Mental, mis colegas y yo encontramos una clave indicativa de la naturaleza de algunas de esas prolongaciones. La amígdala es rica en neuronas que producen los neurotransmisores conocidos por opiáceos endógenos; según se cree, éstos regulan, en otras partes del sistema nervioso, la transmisión de las señales. Descubrimos que las vías que, en el córtex, procesan las sensaciones muestran un gradiente de receptores opiáceos: las moléculas de la superficie celular a las que se unen los opiáceos cuando actúan sobre una neurona. Donde más abundan los receptores es en las estaciones terminales; en ellas toman forma las impresiones sensoriales completas.

En conjunto, las pruebas sugieren la posibilidad de que las fibras que contienen opiáceos discurran desde la amígdala hasta los sistemas sensoriales,

donde desempeñarían una función de guardabarreras, soltando los opiáceos en respuesta a los estados emocionales generados en el hipotálamo. De ese modo, la amígdala permitiría que las emociones influyeran en lo que se percibe y aprende. La reciprocidad de efectos entre la amígdala y el córtex acaso explique por qué, en los monos y en los humanos, los episodios con carga emocional provocan una impresión desproporcionada.

Memoria y hábito

Establecido el curso de dos amplios circuitos, enraizado el uno en la amígdala y el otro en el hipocampo, a los que se deben muchos tipos de aprendizaje cognitivo —la capacidad para reconocer un objeto familiar, evocar sus no percibidas cualidades sensibles, rememorar su localización previa y darle significación emocional— nos quedaba todavía por resolver un enigma. Nos referimos al siguiente fenómeno: algunos pacientes que sufren una pérdida de memoria tan completa que les resulta imposible reconocer una persona a la que acaban de ver pocos minutos antes, conservan, sin embargo, la capacidad de aprender. Hace años, Milner informó que H. M. había aprendido la técnica del dibujo por simetría especular (dibujar mirando en un espejo el movimiento de la propia mano). La aprendió en un tiempo casi normal, aunque después ni siquiera recordara que hubiese hecho tal cosa.

También son capaces de aprendizaje los monos que han sufrido la destrucción de sus estructuras límbicas. Manifiestan estos una torpeza sin remedio al someterlos al ensayo de desemparejamiento de muestras diferido, en el que han de reconocer un objeto visto antes una sola vez. Con todo, Barbara L. Malamut, de nuestro laboratorio, ha descubierto que, si se les muestra una sola vez al día una larga serie de pares de objetos, con un objeto incentivado en cada par, transcurrido cierto tiempo los animales aprenden a escoger el objeto que lleva recompensa. Y, lo que es más, van ganando destreza con un ritmo comparable con el de los monos normales. El observador humano hallaría la segunda tarea más ardua que la primera. ¿Cómo pueden reconciliarse esos resultados en apariencia contradictorios?

Igual que otros muchos investigadores de los mecanismos de la memoria, he venido defendiendo la existencia de un segundo sistema de aprendizaje, de un sistema independiente de los circuitos límbicos. El elemento crítico de tal sistema es la repetición estímulo-respuesta —precisamente lo que falta en el desemparejamiento de muestras diferido. De acuerdo con los datos recabados de amnésicos humanos, Herbert L. Petri, de la Universidad estatal de Towson, y yo hemos propuesto que el segundo sistema procura un tipo diferente de aprendizaje a partir de los recuerdos almacenados por medio de los circuitos límbicos.

Tipo de aprendizaje que hemos dado en llamar "hábito". No es cognitivo: no está basado en el conocimiento, ni siquiera en los recuerdos (entendiéndolos en el sentido de entidades mentales independientes), sino en conexiones automáticas entre un estímulo y una respuesta. En el test de discriminación de objetos, el mono se enfrenta día tras día al mismo par de estímulos; con el tiempo, desarrolla el hábito de tomar aquel objeto cuya selección va siempre reforzada con una recompensa. Por otra parte, la tarea del desemparejamiento de muestras no puede cumplirse mediante formación de hábito. El estímulo que ha de recordarse sólo se ofrece una vez; luego, el mono no tiene ya que responder al mismo estímulo —el que anteriormente llevaba la recompensa— sino a otro nuevo. El animal ha de saber, en un sentido cognitivo, cuál de los objetos es el original, para evitarlo.

Los hábitos, según los definimos nosotros, son reminiscentes de las conexiones automáticas entre estímulo y respuesta que, según sostenían hace tiempo los psicólogos conductistas, constituyen la base de todo aprendizaje. El punto de vista behaviorista excluye términos tales como "mente", "conocimiento" e inclusive "memoria" en su sentido usual. Se opone a la psicología cognitiva, la cual cuenta con esos conceptos para explicar gran parte de la conducta. La posibilidad de que el aprendizaje esté basado en dos sistemas enteramente distintos, fuente uno de ellos de hábitos no cognitivos y fundamento el otro de la memoria cognitiva, brinda un modo de reconciliar la escuela conductista con la cognitivista. Si existen mecanismos nerviosos para los dos tipos de aprendizaje, la conducta quizá resulte ser una mezcla de respuestas automáticas a los estímulos y acciones guiadas por el conocimiento y la expectación.

El córtex estriado, complejo de estructuras situado en el cerebro anterior, constituye un probable sustrato nervioso de la formación del hábito. Recibe prolongaciones de muchas áreas del córtex, incluidos los sistemas sensoriales, y envía fibras a las porciones del cerebro que controlan el movimiento. Se halla, pues, neuroanatómicamente dotado para proporcionar los vínculos bastante directos entre el estímulo y la acción que van implícitos en la noción de hábito. Verdad es que otros investigadores han descubierto que la lesión del cuerpo estriado menoscaba la capacidad de los monos para formar hábitos del tipo de los que se comprueban con el test de discriminación de objetos.

Paul D. McLean, del Instituto Nacional estadounidense de la Salud Mental, señala que el córtex estriado es, desde el punto de vista evolutivo, una zona arcaica del cerebro, mucho más antigua que el córtex y que el sistema límbico. Cabría esperar que la formación del hábito estuviera mediada por estructuras primitivas: hasta los animales más simples aprenden respuestas automáticas ante estímulos. En lo que al desarrollo se refiere, el hábito también parece primitivo. Bachevalier ha observado no hace mucho que las crías de los monos obtienen tan buenos resultados como los adultos en nuestro ensayo de formación de hábito; sin embargo, sus resultados son muy pobres en el de memoria. En la escala de valores de los adultos, son amnésicas. Estudiamos ahora la posibilidad de que el sustrato nervioso del hábito se encuentre plenamente desarrollado en las crías, mientras que el sistema mnémico sea de lenta maduración. Una diferencia pareja en el proceso de desarrollo explicaría, si se diese en los seres humanos, por qué pocos recuerdan bien su infancia.

En cuanto a cómo interactúan recíprocamente en el cerebro maduro la memoria y el hábito, no hemos hecho más que empezar a plantear las preguntas. Parece probable que la mayoría de los tipos de aprendizaje dependan de ambos sistemas, pero resulta fácil ver que la memoria, cognitiva, y el hábito, no cognitivo, suelen entrar en conflicto frecuente. ¿Cómo se las arregla el cerebro para decidir entre la formación de hábitos y el aprendizaje cognitivo? ¿Acaso se comunican con el córtex estriado algunos elementos del sistema mnémico e influyen así en la formación del hábito? Inspeccionando el territorio cerebral de la memoria y del hábito no hemos hecho más que apuntar unas cuantas veredas de futuras exploraciones.

Sequía en Africa

Si los gobernantes comprendiesen el carácter recurrente de este fenómeno devastador del clima subsahariano, podrían abordarlo con procedimientos capaces de estabilizar la producción agraria de los países de la región

Michael H. Glantz

Los medios de comunicación nos ofrecen, con frecuencia, fotografías del flagelo que azota el Africa subsahariana: niños desnutridos, animales consumidos por el hambre, gentes apiñadas en campamentos de refugiados y pozos y abrevaderos secos. Estas angustiosas escenas son el resultado de los repetidos períodos de sequía que durante los últimos 20 años han situado a esta región en el punto de mira de la atención mundial, despertando un solidario interés y ayuda humanitaria.

Cada vez que se produce una sequía, los gobiernos, organismos internacionales de asistencia e instituciones benéficas ponen en marcha programas de ayuda de emergencia y corren ríos de tinta sobre la utilización abusiva de la tierra y la desertización. Pero en cuanto vuelven las lluvias, como ocurrió el año pasado, torna la tendencia a ver en la sequía un fenómeno pasado, guardando en el desván las preocupaciones. La verdad es que la sequía forma parte del clima de la región y volverá a repetirse. Nos hallamos ante un fenómeno estrechamente asociado a un problema básico: el de alcanzar un nivel estable y adecuado de producción agraria en la mayoría de los países del Africa subsahariana; no debería, pues, continuar ignorándose al planificar el desarrollo de la región. Para situar la sequía dentro de una perspectiva a largo plazo hay que empezar por desentrañar sus causas y preguntarse luego por sus efectos y la manera de mitigarlos.

Quizá sea inútil pretender reducir las sequías africanas a una sola causa principal. El clima presenta una amplia gama de regímenes locales y regionales, que reflejan las diferencias en los procesos atmosféricos y en las características topográficas. La zona alberga también muchas sociedades distintas, con sus propias pautas de explotación del suelo, cada una de las cuales requiere unos recursos hídricos distintos.

Las sequías son unos fenómenos bastante frecuentes a escala mundial. Su incidencia varía considerablemente de un año a otro, y a un año de ligera sequía puede sucederle otro con sequías pertinaces. A escala regional, unas zonas tienen una estación lluviosa; otras, dos. En algunas llueve en invierno; en otras, en verano. Por ejemplo, en el Sahel de Africa occidental (la zona de transición entre el Sáhara y la sabana húmeda que se extiende más al Sur) la estación seca dura ocho meses y los cuatro restantes, que coinciden con el verano del hemisferio Norte, corresponden a la estación húmeda. La pluviosidad a lo largo de la estación lluviosa puede presentar notables variaciones locales en el tiempo y el espacio.

Una de las principales dificultades que plantea la lucha contra la sequía radica en el carácter escurridizo del fenómeno. No es fácil advertir cuándo comienza o cuándo se está acabando, puesto que no se distingue con claridad de los períodos habituales de tiempo seco. Como señalaba Ivan R. Tannehill, del Instituto de Meteorología de los Estados Unidos: "El primer día sin lluvia contribuye tanto a crear unas condiciones de sequía como el último, pero nadie puede determinar la gravedad exacta de una sequía hasta que no queda atrás el último día seco y vuelven las lluvias".

La sequía encierra significados distintos para los diferentes grupos de personas, de acuerdo con su interés o su necesidad de que llueva. La noción habitual de sequía la entiende como un fenómeno meteorológico. Pero también pueden darse sequías agrícolas e hidrológicas. Los tres términos no son sinónimos.

La sequía meteorológica puede definirse en función del grado de falta de agua (expresado a través de la reducción percentual con respecto a la pluviosidad media anual o estacional a largo plazo) y de su duración en una región dada. Esta definición admite múltiples variaciones, puesto que su significado suele ir ligado a las condiciones propias de una región y depende de la actividad humana en relación a la cual se valora la pluviosidad. A veces resulta difícil identificar una sequía meteorológica con cierto grado de fiabilidad; en parte por la naturaleza misma del fenómeno y, en parte, porque en muchos países africanos sólo se dispone de datos meteorológicos y climatológicos para un corto período o bien la información recogida es deficiente. Ocurre, asímismo, que los datos sobre la pluviosidad son, muchas veces, de escaso interés inmediato o directo para los encargados de diseñar la política agraria a seguir, ya que pueden influir otras variables en la utilidad de la lluvia que llega a caer: la humedad del suelo, la temperatura ambiente y los índices de evaporación.

La sequía agrícola se produce cuando no existe un grado de humedad adecuado en el momento preciso para la germinación y maduración de la siembra. Ante el distinto requerimiento de humedad que el desarrollo vegetal va reclamando, la distribución de las precipitaciones a lo largo de toda

1. LAGO DE CHAD, que limita con Camerún, Chad, Níger y Nigeria. Ha perdido muchísimo caudal desde la década de los sesenta como consecuencia de la prolongada sequía en la zona del Sahel, en el Africa occidental. Cuando se tomó la fotografía superior desde un satélite Landsat en 1972, el lago cubría unos 25.000 kilómetros cuadrados. Cuando se tomó la fotografía inferior desde otro satélite Landsat, en 1979, tras varios años de pluviosidad inferior a la media, la superficie del lago no llegaba a los 2000 kilómetros cuadrados. En la foto inferior pueden verse muchas dunas antiguas, cubiertas antaño por las aguas del lago.

la estación de crecimiento importa tanto como la cantidad total de lluvia caída cada mes o en toda la estación. M. D. Dennett, de la Universidad de Reading, y sus colegas Jeremy Elston y J. A. Rogers demostraron hace poco que se ha producido un cambio en la distribución estacional de las lluvias en el Sahel oesteafricano, debido principalmente a una menor pluviosidad durante el mes de agosto, el más húmedo por término medio. Al tratarse de una tendencia, sólo es posible apreciar en retrospectiva este cambio perjudicial para la agricultura.

La sequía hidrológica se presenta cuando el nivel de un curso de agua desciende durante un intervalo determinado de tiempo por debajo de cierto límite prestablecido. En general, este tipo de sequía se define en función del nivel a partir del cual la reducción del caudal de agua empieza a afectar significativamente determinadas actividades humanas, como el riego y la generación de energía hidroeléctrica. En el Africa occidental han descendido notablemente, desde finales de la década de los sesenta, los caudales de los ríos Níger, Chari y Senegal.

Por lo que a la sequía meteorológica concierne, el Africa occidental ha experimentado un período de 17 "años secos". El registro histórico señala que se trata de la tercera gran sequía que ha sufrido la región en el siglo XX. Si nos remontamos más atrás, observaremos que las variaciones climáticas siguen diferentes ritmos temporales. Las tres escalas de tiempo aquí relevantes son el milenio, la década y el año.

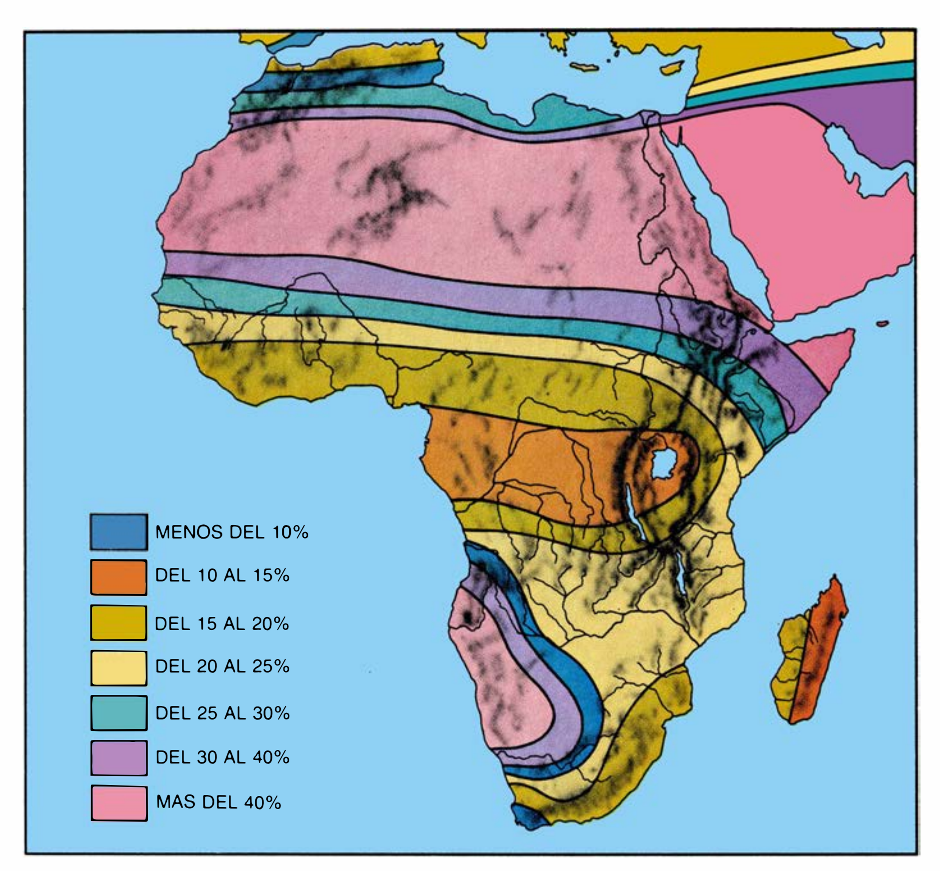
A escala milenaria, distintos investigadores apelan al llamado mecanismo de Milankovitch para explicar la tendencia a la aridez que se aprecia en el Africa subsahariana. El astrónomo serbio Milutin Milankovitch planteó, en 1930, la posibilidad de que los cambios en la órbita elíptica de la Tierra alrededor del Sol incidiesen en el clima. Estos cambios, que se producen a lo largo de varios milenios, son consecuencia de la atracción gravitatoria de los planetas mayores sobre la Tierra.

De ello ha resultado que, hace 10.000 años, el hemisferio Norte recibía una radiación solar cifrada en un ocho por ciento superior en verano, y otro ocho por ciento inferior en invierno, respecto a la situación existente hoy, determinando que los veranos fueran más cálidos y los inviernos más fríos que ahora. Esta mayor amplitud estacional del hemisferio Norte tenía por efecto una ampliación de la circulación de los monzones de verano y de invierno. Y esta circulación, en particular la del monzón de verano, es la causante de la estación lluviosa en las zonas subtropicales.

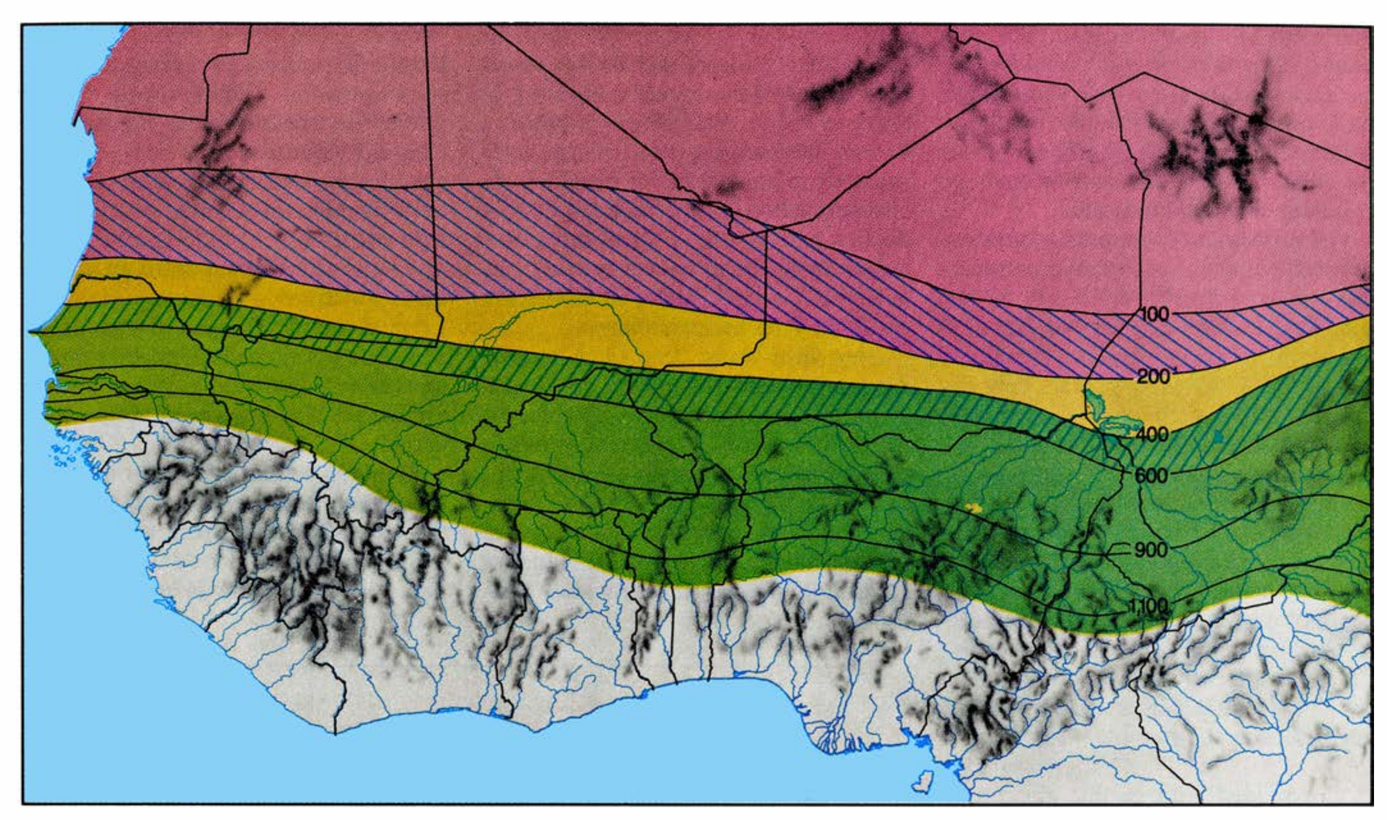
John E. Kutzbach, de la Universidad de Wisconsin en Madison, y Alayne Street-Perrott, de la Universidad de Oxford, construyeron un modelo climático teórico mediante el cual lograron simular, con bastante acierto, a través de la introducción de estas variaciones entre otras, los cambios en la pluviosidad recibida en las zonas subtropicales del norte de Africa, el sur y el sureste de Asia y Centroamérica; cambios que se dedujeron a partir de las fluctuaciones que ha experimentado el nivel de los lagos a lo largo de los últimos 18.000 años. En general, los lagos alcanzaron sus niveles más altos entre 10.000 y 5000 años atrás y la mayoría han ido bajando desde entonces, lo cual parece indicar una progresiva tendencia a la aridez. La Tierra se aproxima ahora más al Sol cuando en el hemisferio Norte es invierno. Dentro de algunos milenios volverá a encontrarse más próxima al Sol cuando en el hemisferio Norte sea verano. Esta relación debería intensificar la actividad monzónica (y por tanto las precipitaciones lluviosas) en las regiones tropicales.

Cuando se trata de los ciclos decenales y anuales, las conjeturas sobre las posibles causas de la sequía en Africa se centran en los factores naturales y en los humanos. Entre los primeros cabe citar las fluctuaciones imprevisibles en el clima a corto plazo, los cambios climáticos a largo plazo, las variaciones en la temperatura superficial del agua del océano Atlántico, los fenómenos asociados a la Oscilación del Sur—El Niño (ENSO) y las anomalías climáticas relacionadas con el ENSO, un ejemplo de lo que los meteorólogos denominan teleconexión, o vinculación entre sucesos ocurridos a una gran distancia. Entre los posibles factores humanos que se han considerado figura el aumento del contenido de dióxido de carbono y de otros gases residuales radiactivos en la atmósfera, como consecuencia de la actividad humana y de la modificación del relieve terrestre.

En términos de fluctuaciones climáticas a corto plazo, las sequías que experimentan las regiones áridas y semiáridas constituyen parte integrante



2. VARIABILIDAD CLIMATICA, expresada en función de la desviación media anual respecto a la pluviosidad normal. En las zonas con una fuerte variabilidad de las precipitaciones y una baja pluviosidad, el riesgo de sequía constituye un rasgo permanente del clima. Tal es en particular el caso de las zonas en rojo.



3. REGIONES DEL AFRICA OCCIDENTAL. De arriba abajo y empezando por la zona en rojo, son: la zona del Sáhara, la subzona saharo-saheliana, la zona del Sahel, la subzona sudano-saheliana y la zona del Sudán. Las cifras que aparecen a la derecha indican las precipitaciones medias anuales en milímetros.

de su clima "normal". En estas zonas, la descripción estadística en función de la pluviosidad media anual aparece sesgada porque considera el promedio entre un pequeño número de años con fuertes precipitaciones y un gran número de años de baja pluviosidad. La pluviosidad anual muy raras veces se aproxima a la media. De ahí que resulte engañoso examinar la sequía en estas regiones limitándose a las variaciones con respecto a la pluviosidad media anual. Es preciso buscar otras referencias estadísticas —por ejemplo, la mediana de pluviosidad (el valor central de una serie ordenada de pluviosidades registradas), la amplitud (los valores máximo y mínimo registrados) y la moda (el valor más frecuentemente registrado)— que permitan describir más adecuadamente las características de la pluviosidad en cada región de Africa.

De los estudios paleoecológicos se desprende que varias zonas del Africa subsahariana han venido experimentando prolongados períodos húmedos y prolongados períodos de sequía durante milenios. Muchos investigadores han analizado los datos estadísticos e históricos intentando identificar los ciclos de la sequía en regiones concretas, pero los ciclos postulados han recibido escasa corroboración científica. Antes bien, han venido a señalar la ausencia de una clara periodicidad. La sequía aparece, por tanto, como un fenómeno acíclico aunque reiterado.

Respecto a los cambios climáticos a largo plazo, a principios de la década de los setenta se inició un debate entre los climatólogos sobre la posible tendencia a un aumento o una disminución de la temperatura global media del planeta. Los partidarios de la hipótesis del enfriamiento hablaban de la inminencia de un nuevo período glacial, apoyándose en el presente período interglacial, que habría durado ya el tiempo habitual (entre 10.000 y 15.000 años). A ello se sumaría otro dato: en 500.000 años, la Tierra sólo ha alcanzado las altas temperaturas del siglo XX en un total de unos 25.000 años.

Diez años atrás, la opinión dominante cambió de signo para inclinarse en favor de la hipótesis del calentamiento. Observaciones pormenorizadas revelaban que la tendencia al enfriamiento del hemisferio Norte, iniciada alrededor de 1940, había inertido su curso hacia mediados de los años setenta. La tendencia a más largo plazo, iniciada a principios de siglo, hacia un calentamiento del planeta se ha atribuido fundamentalmente al aumento del contenido de dióxido de carbono de la atmósfera. Todavía no se ha logrado determinar con exactitud si el calentamiento del clima a escala planetaria provocará una pluviosidad mayor, o menor, en las regiones africanas consideradas hoy propensas a la sequía.

La corriente del Niño es la penetración transitoria de agua superficial cálida en las zonas costeras ecuatoriales del Pacífico, frente a las costas de Perú y Ecuador. Se trata de una manifestación local de la Oscilación del Sur, como se llama la fluctuación de las diferencias medias de presión (a nivel del mar) entre las zonas occidental y oriental del Pacífico ecuatorial. Se ha establecido una relación entre los episodios de ENSO y la aparición de sequías y otras anomalías climáticas en el mundo entero. El episodio de ENSO correspondiente a 1982-83 fue el más intenso de cuantos se han registrado, en el plazo de un siglo como mínimo, en punto a la enorme elevación de la temperatura superficial del océano, su extensión geográfica y su impacto social. Eugene M. Rasmusson, de la Universidad de Maryland en College Park, establece una fuerte correlación entre los episodios de Oscilación del Sur y la pluviosidad en el Africa suroriental (la región de Mozambique y Zimbabwe), donde, según sus observaciones, 22 de las 28 últimos episodios han coincidido con

una caída de la pluviosidad. Sin embargo, la correlación que establece entre episodios de ENSO y las variaciones de la pluviosidad en Etiopía, en el Sahel oesteafricano y en el Africa oriental (la región de Tanzania, Kenya y Uganda) es mucho más débil.

Las variaciones en la temperatura superficial del agua del Atlántico ofrecen una explicación más adecuada de las sequías del Africa occidental. Los modelos climáticos construidos por D.E. Parker, C.K. Folland y T.N. Palmer, del Instituto Británico de Meteorología, corroboran la opinión según la cual, citando sus palabras, "la presencia de aguas más calientes de lo normal en la parte tropical meridional del Atlántico, sobre todo en el golfo de Guinea, ha tendido a favorecer unas condiciones de sequía en el Sahel durante la estación húmeda, como consecuencia de las alteraciones registradas en la circulación atmosférica y en el transporte de humedad en los trópicos".

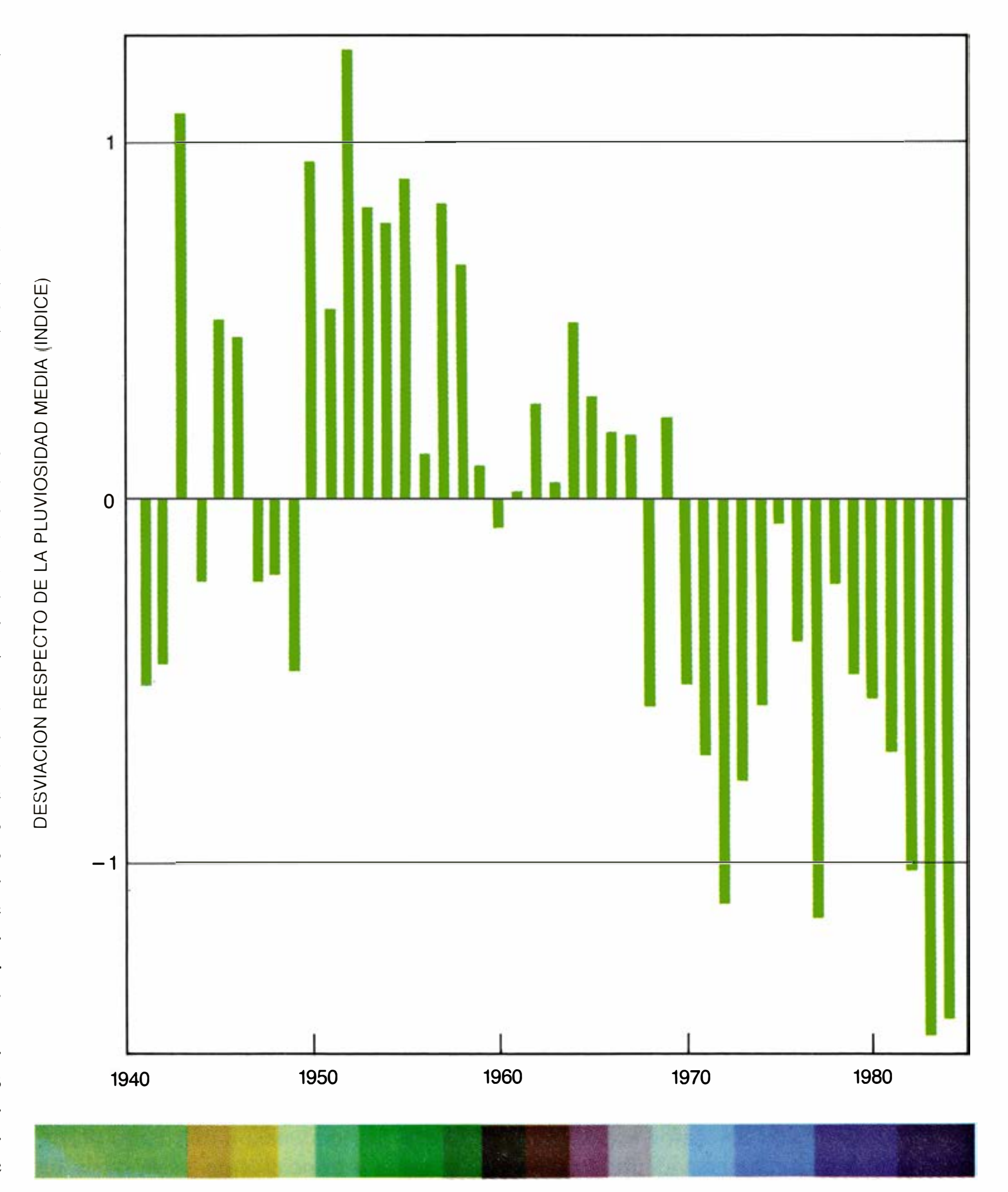
La actividad humana que más preocupa es la relativa al consumo de combustibles fósiles en cantidades sin precedentes en toda la historia. Un número creciente de científicos sustenta la opinión según la cual el incremento del contenido de dióxido de carbono y de otros gases radiactivos –metano, ozono, fluorocarbonos y óxidos de nitrógeno– en la atmósfera está provocando un calentamiento de sus capas bajas. Estos gases crean un efecto de "invernadero": son transparentes a las radiaciones solares de onda corta (región del visible) y absorben o reemiten a la tierra las radiaciones solares de longitud de onda larga (rayos infrarrojos) que la superficie terrestre refleja hacia la atmósfera.

El calentamiento de las capas inferiores de la atmósfera alteraría los procesos hidrológicos y la distribución local de los regímenes de lluvias, aunque todavía no se conocen bien sus efectos a escala regional. Sin embargo, algunos científicos dedicados a los estudios atmosféricos aventuran la posibilidad de que la prolongada sequía sufrida recientemente en Africa fuese una primera manifestación del impacto regional de este tipo de calentamiento.

La segunda actividad humana preocupante es la modificación de los suelos por efecto de la desforestación, la sobrexplotación de los pastos y la desertización, así como a través de la tala de árboles para hacer fuego y para la construcción. Estas actividades pueden aumentar el albedo de la superficie terrestre, esto es, su tendencia a reflejar la luz solar. La cantidad de luz absorbida es consiguientemente menor y la tierra se enfría. Este efecto provoca, a su vez, alteraciones en las capas inferiores de la atmósfera. La presencia de aire frío sobre la superficie terrestre y de aire caliente en las capas superiores reduce la actividad convectiva de la atmósfera. Lo cual inhibe la formación de nubes y las precipitaciones.

Diez años atrás, Jule G. Charney, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, entre otros, sugirió que un aumento del albedo superficial intensificaba la sequía regional. Según la hipótesis de Charney, la sequía se autoperpetúa y va intensificándose con el número de personas que deben obtener su sustento a partir de los recursos cada vez más escasos de la tierra, lo cual les lleva a despoblarla progresivamente de su vegetación. Ultimamente se ha puesto en cuestión esta hipótesis de Charney. Estudios históricos sobre los cambios ecológicos ocurridos en el Sahel oesteafricano revelan que la variación del albedo ha sido mucho menor de lo que se había supuesto en los modelos construidos mediante ordenador. Lo cual significaría que, si bien es posible que estén produciéndose cambios en el albedo, éstos difícilmente podrían ejercer un efecto evidente a escala regional.

También se han apuntado otras posibles repercusiones de las alteraciones de la superficie terrestre que podrían incidir sobre la pluviosidad. Por ejemplo, podría disminuir el número de nú-



4. INDICE DE PRECIPITACIONES *(izquierda)* **para una región del Africa occidental, Sahel incluido. Peter J. Lamb lo elaboró a partir de los datos recogidos en 20 estaciones pluviométricas. En él puede apreciarse que las precipitaciones fueron inferiores a lo normal desde 1968 hasta 1985. La pluviosidad mejoró algo el**

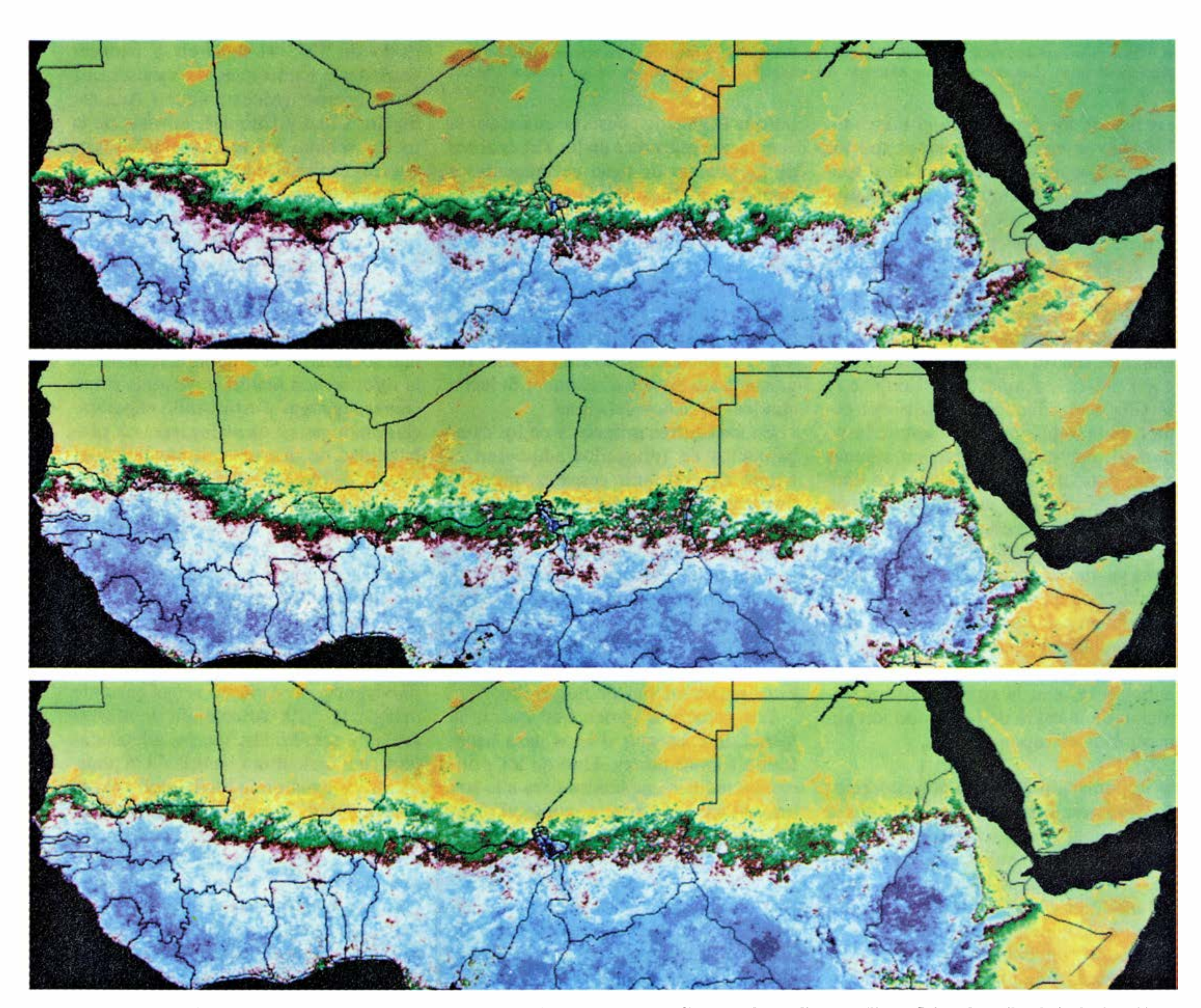
cleos de hielo formados en la atmósfera en torno a los residuos de la descomposición de las hojas y otros restos vegetales. Estos núcleos contribuyen a iniciar las precipitaciones. De los estudios realizados parece desprenderse que los núcleos orgánicos son más favorables para la formación de lluvias que los inorgánicos (verbigracia, el polvo), porque estos últimos requieren temperaturas mucho más bajas en el interior de las nubes antes de que comience la congelación.

La desertización es otra alteración de la superficie terrestre que podría influir en la pluviosidad, al aumentar la cantidad de polvo presente en las capas inferiores de la atmósfera. Estas partículas absorben y dispersan la luz solar; con ello, la capa superior de polvo se calienta y parte de las radiaciones solares no llegan a la superficie, bastante más fría, de la tierra. Así se reduce también la actividad atmosférica generadora de precipitaciones.

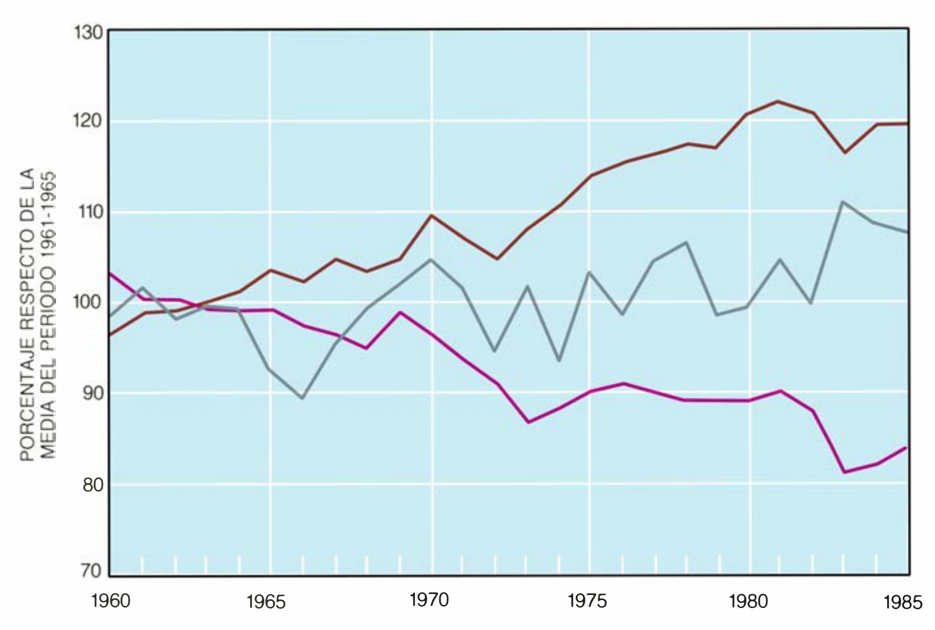
Los estudios sobre estas condiciones geofísicas abordan sólo un grupo de causas de las prolongadas sequías y hambres que asolan el continente africano. Pero descuidan un aspecto importante: las complejas interacciones entre la variabilidad del clima y la actividad humana. Unas interacciones que es preciso tener en cuenta para comprender las repercusiones de las sequías sobre la agricultura, los ecosistemas y la economía.

En el Africa subsahariana, donde la pluviosidad incide directamente sobre el bienestar de más de un 80 por ciento de la población dedicado a la agricultura, el impacto de la sequía se deja sentir en todos los ámbitos. Algunos de sus efectos son patentes: desecación de las charcas, agostamiento de las cosechas y disminución del forraje para el ganado. Existen otras consecuencias, menos visibles, que revisten pareja importancia. Citemos la subida de los precios, el crecimiento de las importaciones de productos alimentarios, cambios en el estado de nutrición de las poblaciones en situación de riesgo y aumento de la emigración del campo a los centros urbanos.

Las migraciones nos hablan de los efectos devastadores para los habitantes de las aldeas, de la pérdida de las cosechas y de la fuerte subida de los



pasado año y sus efectos sobre la vegetación pueden apreciarse en la información transmitida por satélite (*derecha*) y recopilada por la Organización Mundial para la Alimentación y la Agricultura y por la NASA norteamericana. Las fotografías, tomadas mediante satélite, reflejan, de arriba abajo, la situación en agosto y septiembre de 1984, 1985 y 1986. Las zonas en verde claro representan la vegetación más rala; en color azul oscuro, la vegetación más frondosa.



5. PRODUCCION DE ALIMENTOS en el Africa subsahariana. Ha venido descendiendo desde principios de los sesenta, en parte como consecuencia de las escasas precipitaciones. Aquí se compara la situación en el Africa subsahariana, excluida Sudáfrica (*rojo*), en Iberoamérica (*marrón*) y en seis naciones del Asia meridional (*gris*). Los datos se han obtenido del ministerio de Agricultura de los Estados Unidos.

precios de los cereales en el mercado. Los que se ven más afectados son los campesinos más pobres, que no disponen, por lo común, de reserva suficiente de cereales y están muy endeudados. Si la sequía agrícola dura más de un par de estaciones, la población comienza la diáspora. Los primeros en marcharse son los hombres, que parten en busca de un trabajo que les permita ganar un salario de subsistencia. Les siguen mujeres y niños para juntarse la familia o sencillamente para poder comer. Si la sequía persiste durante largo tiempo, como ha ocurrido en algunas zonas del Africa subsahariana, los emigrantes acaban, ya muy debilitados, en campos de refugiados, donde dependen totalmente de la ayuda alimentaria para su subsistencia. Muchos de estos desplazamientos de la población adquieren un carácter permanente, con lo cual va disminuyendo progresivamente el número de personas dedicadas a la agricultura, con la consiguiente aceleración de la caída de la producción alimentaria per cápita.

La población dedicada al pastoreo es la primera en verse afectada por la sequía, pues suele vivir en el límite con el desierto. En el Sahel, cuando las lluvias no alcanzan su cota septentrional habitual, los pastos se deterioran y disminuye el alimento para el ganado. Los pastores se ven obligados a buscar nuevos pastos. Cuando la sequía es extrema, mueren muchos animales de hambre, por falta de vegetación, y sed. Esta situación a menudo se produce porque el ganado consume en exceso la vegetación que crece en los alrededores de las charcas de agua permanentes y semipermanentes donde acude a abrevar, destruyendo el equilibrio entre vegetación y recursos hídricos. Muchos pastores acaban refugiándose en los campamentos en compañía de los campesinos pobres, o se instalan en los centros urbanos; allí se acostumbran a las nuevas condiciones de vida y ya no regresan a sus pastos a reanudar la lucha con los caprichos del clima.

En los centros urbanos y en los campamentos de refugiados adquieren el hábito de consumir cereales importados, trigo y arroz, por ejemplo, en vez de los cultivos tradicionales, como el mijo y el sorgo. Esto genera otro efecto a largo plazo, y a veces oculto, de la sequía: un incremento de la demanda de cereales importados para la alimentación; lo que implica un fuerte drenaje de las precarias reservas de divisas de estos países en vías de desarrollo.

Los gobiernos tienen que buscar la forma de conseguir divisas para hacer frente a estos costes. Uno de los principales medios empleados para ello son los cultivos industriales, como el algodón, los cacahuetes y el café, destinados a la exportación. Estas plantaciones se desarrollan a expensas de los cultivos tradicionales. En efecto, los industriales suelen plantarse en zonas de terrenos fértiles y con un adecuado abastecimiento de agua, que anteriormente se destinaban a la producción de cultivos alimentarios. Es interesante señalar que, incluso durante las graves sequías que asolaron el Sahel oesteafricano y Etiopía a principios de las décadas de los setenta y de los ochenta, continuó manteniéndose la producción y la exportacióbn de cultivos industriales. Más aún, llegó a aumentar en el mismo momento en que disminuía bruscamente la producción de cultivos alimentarios.

Cada año se registran sequías en muchas partes del mundo, pero éstas no se traducen necesariamente en hambrunas y escasez de alimentos. Brasil, la India, Indonesia y Kenya ofrecen ejemplos de naciones que han conseguido superar, mediante diversos procedimientos, condiciones de grave sequía en los últimos años.

Sólo un pequeño número del total de países africanos que se vieron afectados por una escasez de alimentos en el período de 1982-84 llegaron a padecer verdaderas hambrunas. Los países que las sufrieron (Mozambique, Angola, Sudán, Chad y Etiopía), además de la fuerte sequía, se veían asolados por guerras civiles. De lo cual se desprende claramente que la sequía, por sí sola, no determina que llegue a sufrirse hambre. Aunque sí intensifica otros problemas que puedan aquejar a una sociedad.

Es posible establecer proyecciones más fiables sobre la vulnerabilidad de una sociedad a la sequía recurriendo a la información histórica de otras situaciones análogas y estudiando experiencias análogas en otros lugares. La probabilidad de que un país afectado por conflictos internos padezca hambre en caso de sequía es elevada. En este contexto cabría citar la reciente experiencia de Etiopía. Igualmente, aunque el efecto sea menos evidente, los gobiernos que se apropian de las mejores tierras para dedicarlas a cultivos industriales desplazan a los agricultores y pastores locales, obligándoles a una supervivencia precaria en zonas bastante marginales. La roturación de tierras áridas y semiáridas, menos adecuadas para una agricultura basada en la aportación de agua de la lluvia, aumenta la probabilidad de que la sequía tenga repercusiones adversas para la agricultura e intensifique la desertización. Lo que no significa necesariamente que tenga su origen en un cambio en la distribución de las precipitaciones y de las probabilidades de lluvia, sino en el hecho de que las nuevas actividades requieren unos recursos hídricos que la lluvia no puede aportar a largo plazo.

Los gobiernos africanos y las apor-

taciones extranjeras han visto en el riego una salvaguarda contra la sequía; pero ésta muchas veces ha resultado poco eficaz. El sistema de irrigación es caro. Los cultivos de regadío, además de una infraestructura de bombas, tuberías y canales, precisan también costosas inversiones en abonos, herbicidas y pesticidas. Los cultivos alimentarios tradicionales no pueden sufragar, por lo común, estos costes, y los gobiernos de la mayoría de los países africanos han de mantener artificialmente bajos los precios de los alimentos y de los productos agrícolas a través de medidas de política económica. Aparece, en lógica consonancia, el diseño gubernamental de planes de regadío para los cultivos industriales, como el algodón y el azúcar, que generen las divisas apremiantes. El regadío abarca sólo un pequeño porcentaje del suelo agrícola de Africa y es poco probable que se adopte de forma generalizada para la producción de cultivos alimentarios tradicionales.

Entre otras posibles propuestas de protección contra la sequía figuran proyectos encaminados a modificar el clima y la meteorología. Estos pueden dividirse según pretendan actuar a través de la vegetación (construcción de cinturones forestales y repoblación de las zonas desertizadas), sobre la circulación atmosférica (creación de mares interiores en antiguas zonas de desagüe y así aumentar la humedad atmosférica, por la evaporación) o sobre las precipitaciones (creación de frentes monzónicos de gran tamaño y de nubes locales). Estos remedios tecnológicos basados en hipótesis científicas son a menudo de dudoso valor y es posible que en la práctica sólo sirvan para encubrir otros procesos ecológicos y sociales de alcance más profundo, mientras crean vanas esperanzas.

Las únicas alternativas plausibles a medio plazo son las medidas encaminadas a mitigar el impacto de la sequía sobre las sociedades africanas. Entre otras: la sustitución de los cultivos industriales por cultivos alimentarios mientras dure la sequía o la canalización de las divisas obtenidas a través de la exportación de cultivos industriales hacia la adquisición de alimentos para las poblaciones afectadas; el envío de ayuda adecuada para las necesidades de sus destinatarios y la consideración de las condiciones climáticas y la estructura agrícola antes de poner en marcha nuevos planes agrícolas. Y sobre todo, cualquier alternativa debe tener presente que la sequía por sí sola no suele provocar las terribles desgracias que suelen atribuírsele. Lo fundamental es tener bien claro que los efectos de la sequía pueden combinarse con otros problemas sociales, económicos o políticos ya existentes para socavar la capacidad de producción de alimentos de una sociedad.

A largo plazo, habrían de adoptarse otras medidas. Así, la puesta en marcha, a través de organismos como el Banco Mundial, de un programa de educación que hiciera ver que la sequía constituye una importante fuerza perturbadora que reaparece de forma reiterada y con la que hay que contar en las medidas políticas que se tomen. Importa que los gobernantes de los países vulnerables vean en ella un obstáculo para el desarrollo. Tal programa educativo debería desarrollarse de forma ininterrumpida, habida cuenta de que muchos dirigentes suelen permanecer en el cargo menos tiempo del que media entre una y otra sequía.

Los gobiernos deberían adoptar medidas encaminadas a frenar la tendencia que relega la agricultura y el pastoreo hacia zonas de pluviosidad marginal o suelos de escasa capacidad. Cuando la agricultura y el pastoreo se extienden hasta abarcar las tierras marginales, las consecuencias de la sequía agrícola (incluida la pérdida de las cosechas y la erosión del suelo) agravan la escasez de alimentos y aceleran la desertización.

Los gobiernos podrían ampliar también la aplicación de sus servicios meteorológicos a la agricultura. Estos servicios ayudarían a los expertos ofreciéndoles las posibilidades de fundamentar sus decisiones, en lo tocante al desarrollo agrícola, en una información meteorológica adecuada. Y podrían participar en la creación de sistemas de alerta precoz destinados a advertir a los gobiernos de la aparición de condiciones que podrían desencadenar una hambruna.

Cada vez está más claro que la exclusiva valoración de los aspectos físicos de una sequía (su magnitud, duración, intensidad y extensión geográfica) contribuye muy poco a entender por qué sequías con características físicas parecidas tienen distintas repercusiones según los países e incluso la época dentro de una misma región. Sólo unos estudios multidisciplinarios que aborden también los factores sociales, económicos y culturales permitirán comprender mejor la situación.

Mecanismo molecular de la fotosíntesis

La conjunción de la espectroscopía, cristalografía de rayos X y genética molecular saca a la luz las etapas de la fotosíntesis y la participación de las moléculas implicadas en el proceso

Douglas C. Youvan y Barry L. Marrs

La fotosíntesis, el proceso que transforma la luz solar en la energía que precisan las funciones vitales de los organismos, constituye la piedra angular de la vida terrestre. La energía capturada mediante la fotosíntesis no sólo nutre a los organismos fotosintetizadores, sino también, y en última instancia, a los animales que se alimentan de ellos, a sus depredadores y, en general, a cuantos integran la cadena trófica. ¿Cómo funciona la fotosíntesis? ¿Cuáles son las interacciones que, en el nivel molecular, capturan la energía de la luz solar y la convierten en energía vital? ¿Cuál es la arquitectura –la organización espacial– de las moléculas implicadas? ¿De qué forma esa topología determina la velocidad y la eficacia del proceso fotosintetizador?

Cuestiones todas ellas que empiezan a recibir ya una respuesta apropiada. El esfuerzo de numerosos investigadores, de campos tan dispares como la espectroscopía, la cristalografía de rayos X y la genética molecular, ha posibilitado un conocimiento bastante preciso del mecanismo molecular de cierto tipo de fotosíntesis: la de determinadas bacterias.

Cada una de las disciplinas mencionadas ha sacado a la luz aspectos diferentes del proceso. Los espectroscopistas han determinado la secuencia y la periodicidad de los fenómenos moleculares de las reacciones lumínicas de la fotosíntesis (las reacciones que constituyen la primera etapa del proceso), así como la velocidad con la que se produce cada interacción. Los cristalógrafos de rayos X han resuelto la estructura espacial del centro fotosintético de reacción (región donde tienen lugar las reacciones lumínicas), y han descubierto que las moléculas de dicho centro de reacción se encuentran alineadas. Los genéticos moleculares han localizado y analizado –y ahora pueden manipular– los genes que dirigen la construcción de los principales componentes del centro de reacción.

El conocimiento de las interacciones moleculares, la estructura y las bases genéticas del centro fotosintético de reacción permite acotar mejor nuestras preguntas sobre su función. ¿Cómo contribuye la presencia de cada una de las moléculas del centro de reacción a la función del conjunto? ¿Por qué unas etapas de las reacciones lumínicas son más rápidas, o más lentas, que otras? ¿Hasta qué punto cambiaría todo el proceso si un elemento dado tuviera una forma o composición ligeramente distinta?

Hay varios investigadores, nuestro grupo entre ellos, que abordan esos interrogantes desde el prisma de la genética molecular. Alterando la información genética que codifica ciertos elementos del centro de reacción, uno de los autores (Youvan) ha obtenido cepas de bacterias fotosintetizadoras cuyos centros de reacción difieren de los característicos de las células no modificadas. El análisis de la fotosíntesis en estos organismos modificados revelará en qué medida ha afectado el cambio a su eficacia fotosintetizadora.

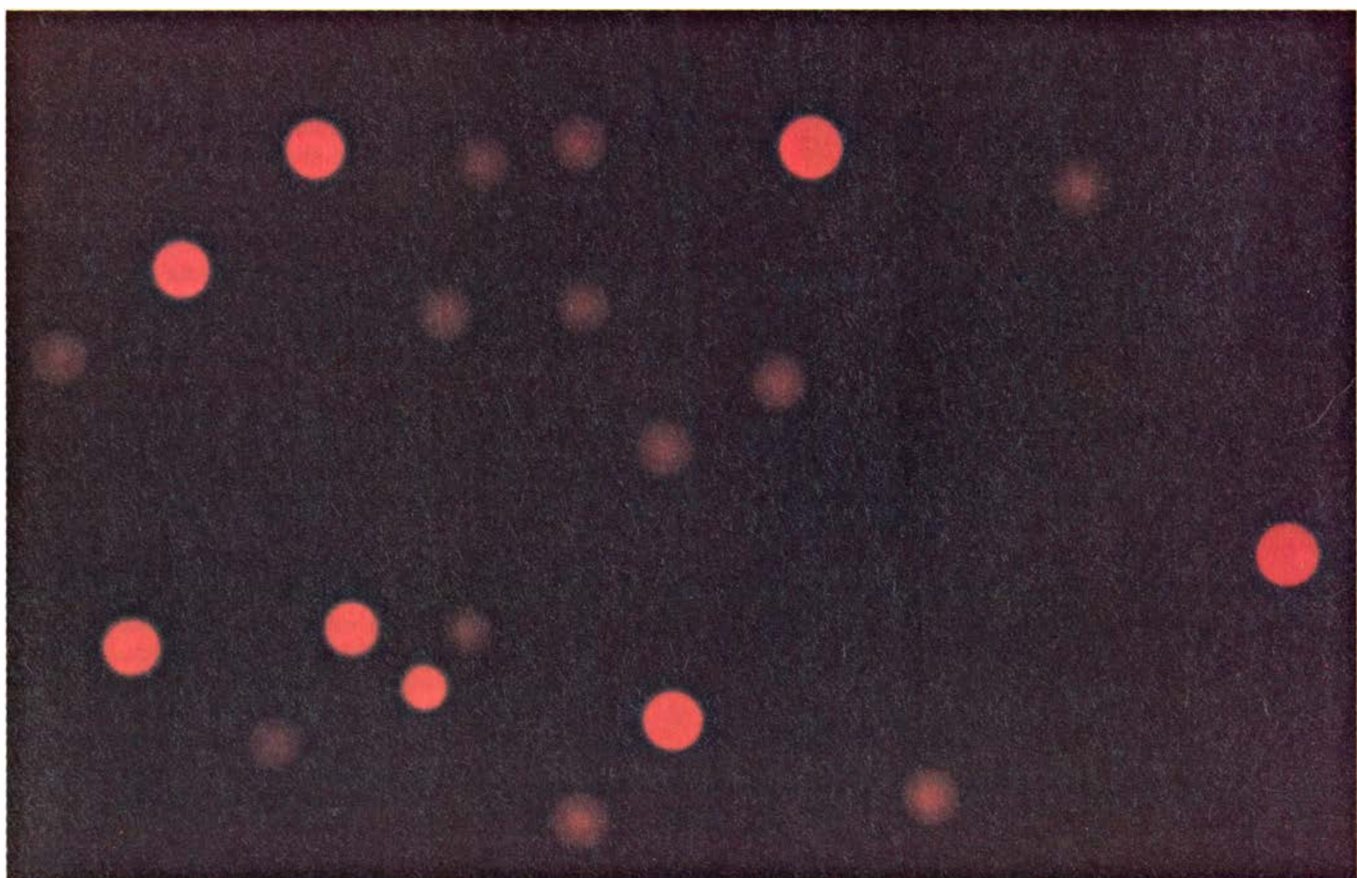
Este tipo de técnicas ayudan a conocer en detalle los mecanismos de la fotosíntesis. Los resultados –interesantes por sí mismos– podrían, en última instancia, facilitar el diseño y producción de organismos capaces de fotosintetizar a través de vías especializadas o en ambientes adversos.

El sujeto de investigación lo constituyen las bacterias pertenecientes al género *Rhodopseudomonas*. Realizan éstas su fotosíntesis a través de un proceso similar al de las primeras bacterias que, hace más de tres mil millones de años, desarrollaron un método para captar la energía solar. La fotosíntesis de las rodopseudomonas difiere en cierta medida de la que llevan a cabo las plantas superiores; así, esta fotosíntesis bacteriana no produce oxígeno. No obstante, existen grandes semejanzas entre ambos procesos. Por ejemplo, en los dos tipos intervienen moléculas de clorofila.

Una ventaja especial que ofrece el estudio de las rodopseudomonas es que, a diferencia de las plantas superiores, obtienen la energía necesaria para su crecimiento no tan sólo a través de la fotosíntesis, sino también por otros procesos metabólicos. Ello las capacita para sobrevivir y multiplicarse al margen de la fotosíntesis, y permite a los investigadores cultivar mutantes que presenten algún defecto en sus centros fotosintéticos de reacción, así como estudiar, in vivo, las lesiones específicas que dañan la función fotosintetizadora.

El interior de las células de las rodopseudomonas está repleto de vesículas fotosintetizadoras; se les da ese nombre a ciertas esferas, huecas y pequeñas, formadas por bicapas lipídicas (el mismo material que constituye las membranas celulares). Los centros fotosintéticos de reacción, compuestos fundamentalmente por proteínas, se encuentran insertados en la membrana de las vesículas fotosintetizadoras. Un extremo del centro de reacción se halla cerca de la superficie externa de la membrana, mientras que el otro extremo se encuentra próximo a la interna.

Al iniciarse las reacciones lumínicas de la fotosíntesis, el extremo del centro de reacción más cercano a la superficie interna de la membrana captura un fotón (paquete de energía luminosa). Se



1. UNA MUTACION GENETICA bloquea la fotosíntesis en algunas de estas colonias bacterianas del género *Rhodopseudomonas*. A la luz visible (*arriba*) las bacterias normales resultan indistinguibles de las mutantes. La irradiación con infrarrojo cercano (*abajo*) confiere fluorescencia a las bacterias mutantes y aparecen brillantes. Los mutantes emiten la energía que han absorbido y no pueden utilizar. Los mutantes sobreviven gracias a que son capaces de obtener energía por otros procesos. Lo cual permite su cultivo y el estudio de los efectos precisos de mutaciones en los genes que codifican las funciones fotosintetizadoras.

excita un electrón de esa zona (elevándose hasta un nivel energético superior) y, mediante una serie de interacciones químicas, se transporta la energía del fotón al otro extremo del centro de reacción (próximo a la superficie externa de la membrana). Un segundo fotón insta a otro electrón a seguir el mismo camino. Tales interacciones provocan una separación de carga: los electrones, cargados negativamente, emigran hacia la superficie externa de la membrana, mientras que las moléculas que llevan exceso de carga positiva, por haber perdido electrones, permanecen cerca de la superficie interna de la membrana. La separación de carga es, en realidad, una forma de almacenar energía, pues ésta se liberaría si los electrones y las moléculas dotadas de carga positiva lograran reunirse de nuevo. Finalmente, dicho almacenamiento de carga induce una serie de reacciones químicas, acopladas entre sí, que producen la energía necesaria para llevar a cabo diversos procesos del metabolismo bacteriano.

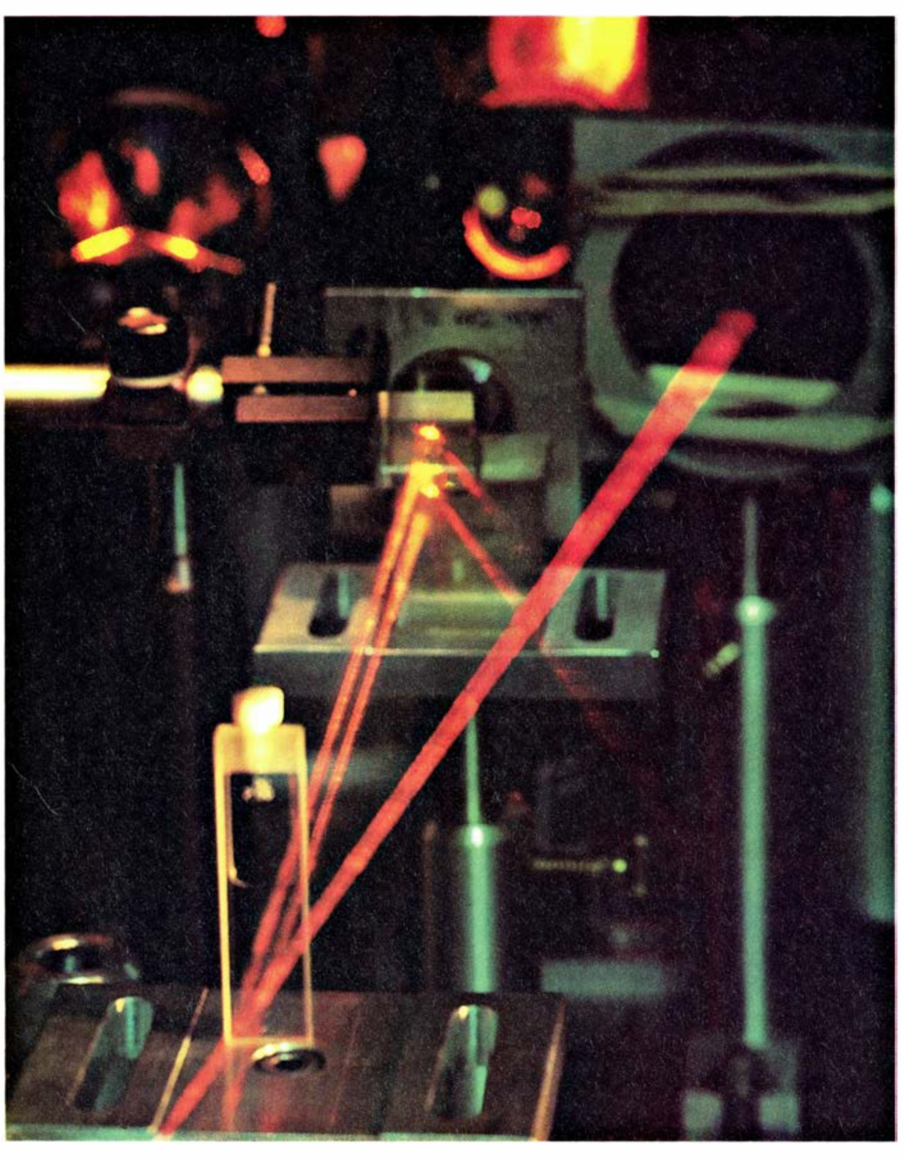
¿Qué interacciones conducen los electrones desde una cara de la membrana hasta la otra? Los espectroscopistas han hallado la respuesta utilizando la radiación electromagnética para determinar la estructura química de la materia.

Reviste particular interés la denominada espectroscopía óptica de absorción; en su uso, se fuerza el paso de un haz de luz a través de una muestra y se mide la cantidad de luz que ha absorbido. Cada especie molecular absorbe sólo la luz de determinadas longitudes de onda, o colores de la luz. La longitud de onda absorbida depende de la estructura de la molécula y de su entorno químico. Cada clase de molécula deja su propia "huella" espectroscópica; el espectroscopista puede determinar, pues, la composición de una muestra si conoce su espectro de absorción (la cantidad de luz absorbida de las diferentes longitudes de onda).

La absorción de un fotón por parte del centro fotosintético de reacción produce, en su estructura, una serie de cambios químicos, como las interacciones que transportan al electrón a través de la membrana. Tales cambios químicos pueden analizarse observando cómo varía el espectro de absorción del centro de reacción, una vez absorbido un fotón. Con estudios de este tipo puede trazarse la "ruta química" del electrón desde una superficie de la membrana hasta la otra.

Muchos grupos se han adentrado en ese campo. En sus experimentos, el haz sonda (aquel que sirve para medir el espectro de absorción de una muestra de los centros de reacción, extraídos de una población bacteriana) es suficientemente débil para que no se desarrolle la fotosíntesis en cuantía apreciable. Se induce luego la fotosíntesis en la muestra mediante una intensa exposición a luz láser de duración inferior a un picosegundo (una billonésima de segundo). El pulso de luz láser es tan breve, que cada centro de reacción de la muestra absorbe como máximo un único fotón; por consiguiente, las reacciones fotosintetizadoras resultantes están sincronizadas: en un momento dado, todos los centros de reacción se hallan sometidos a la misma transformación química. Así, el espectro de absorción de la muestra refleja el estado químico de cada centro de reacción y permite, tras sucesivas exposiciones, deducir la naturaleza y la secuencia de las reacciones de las primeras etapas de la fotosíntesis.

Se utiliza también en espectroscopía el método de resonancia de espín electrónico. Todos los electrones poseen cierto espín. Como es el caso de cualquier partícula dotada de espín, el electrón crea un campo magnético; en cierta forma, el electrón es como una



2. POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORCION puede determinarse, en una billonésima de segundo, el transcurso temporal y la secuencia de las reacciones que constituyen las primeras etapas de la fotosíntesis. Dos tenues haces sonda (*centro*) atraviesan una muestra fotosintética situada en una cubeta (*primer término*). En función de la debilidad de los haces, la fotosíntesis no alcanza una cuantía significativa. Los aparatos fotorreceptores (que no se recogen en la fotografía) determinan la constitución química de la muestra analizando la luz que la atraviesa. Un intenso destello láser, de duración inferior a una billonésima de segundo (*derecha*), estimula la fotosíntesis en una pequeña zona que, a su vez, es atravesada por uno de los haces sonda. Dada la brevedad del destello, todos los centros de reacción (complejos moleculares donde tienen lugar las primeras reacciones de la fotosíntesis) fotosintetizan sincrónicamente. A medida que avanza el proceso, cambia la constitución química de la muestra. La naturaleza de dichas variaciones puede determinarse analizando la absorción de luz del haz sonda. El aparato experimental recogido en esta fotografía es del laboratorio de Michael R. Wasielewski, del Laboratorio Nacional Argonne, de los Estados Unidos.

diminuta barra imantada. En la mayoría de compuestos estables, todos los electrones están apareados y sus campos magnéticos se encuentran alineados en sentidos opuestos. No obstante, en algunas moléculas hay electrones desapareados. En la espectroscopía de resonancia de espín electrónico, el investigador mide el cambio energético de los electrones desapareados en un campo magnético que fluctúa rápidamente. Los resultados informan sobre el entorno molecular de los electrones desapareados.

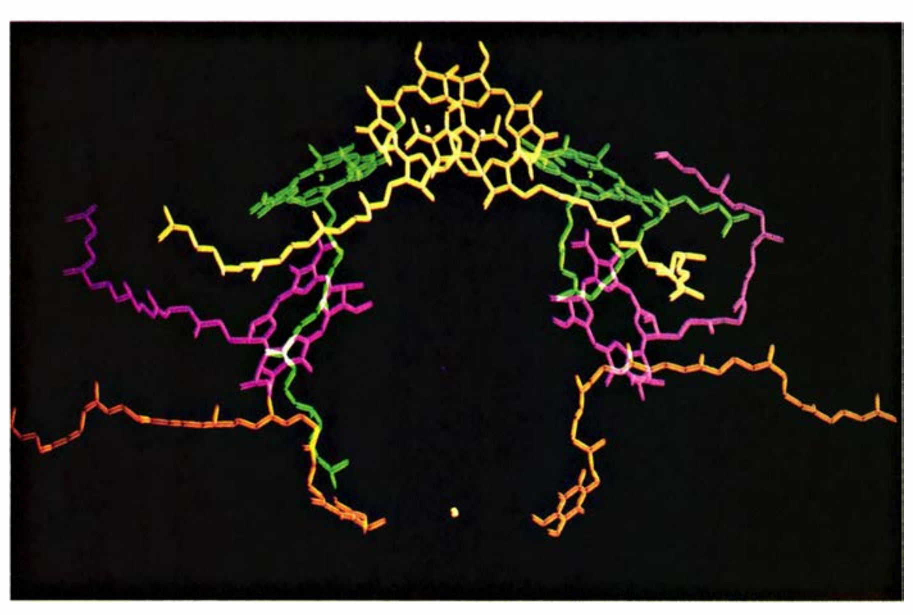
En la década de 1970, George Feher y sus colaboradores, de la Universidad de California en San Diego, e independientemente James R. Norris y sus colegas, del Laboratorio Nacional Argonne, de los Estados Unidos, identificaron el primer paso de la fotosíntesis aplicando la espectrocopía de resonancia de espín electrónico. Detectaron la señal de un electrón desapareado en las moléculas de clorofila que habían absorbido un fotón. El desapareamiento del electrón debíase a que, al absorber el fotón, las moléculas de clorofila habían cedido un electrón. La naturaleza de la señal de la resonancia de espín electrónico demostró que el elemento que absorbía el fotón en el centro de reacción se componía de dos moléculas de clorofila en estrecha asociación.

La espectroscopía ha revelado la secuencia y las relaciones temporales de las reacciones de transferencia de electrones que tienen lugar en el centro fotosintético de reacción tras la absorción de un fotón. ¿Cuál es la arquitectura de ese centro? ¿Qué trayectoria física sigue el electrón en su tránsito de un lado de la membrana a otro?

Puede abordarse ese tipo de preguntas mediante cristalografía de rayos X, que, hoy, es el único método capaz de poner de manifiesto, en el nivel atómico, la estructura de moléculas biológicas complejas. La técnica consiste en dirigir un haz de rayos X contra un cristal y determinar, a continuación, las direcciones que toman los rayos difractados por el cristal. A partir del patrón de difracción se establece la estructura molecular del cristal.

La principal dificultad que opone la aplicación de la cristalografía de rayos X al análisis del centro fotosintético de reacción radica en la muestra a analizar: debe ser un cristal perfectamente ordenado. Cristalizar una proteína constituye un trabajo arduo, de gran esmero, y requiere también que al cristalógrafo le acompañe la suerte. En los últimos 20 años se han cristalizado y analizado unos centenares de proteínas



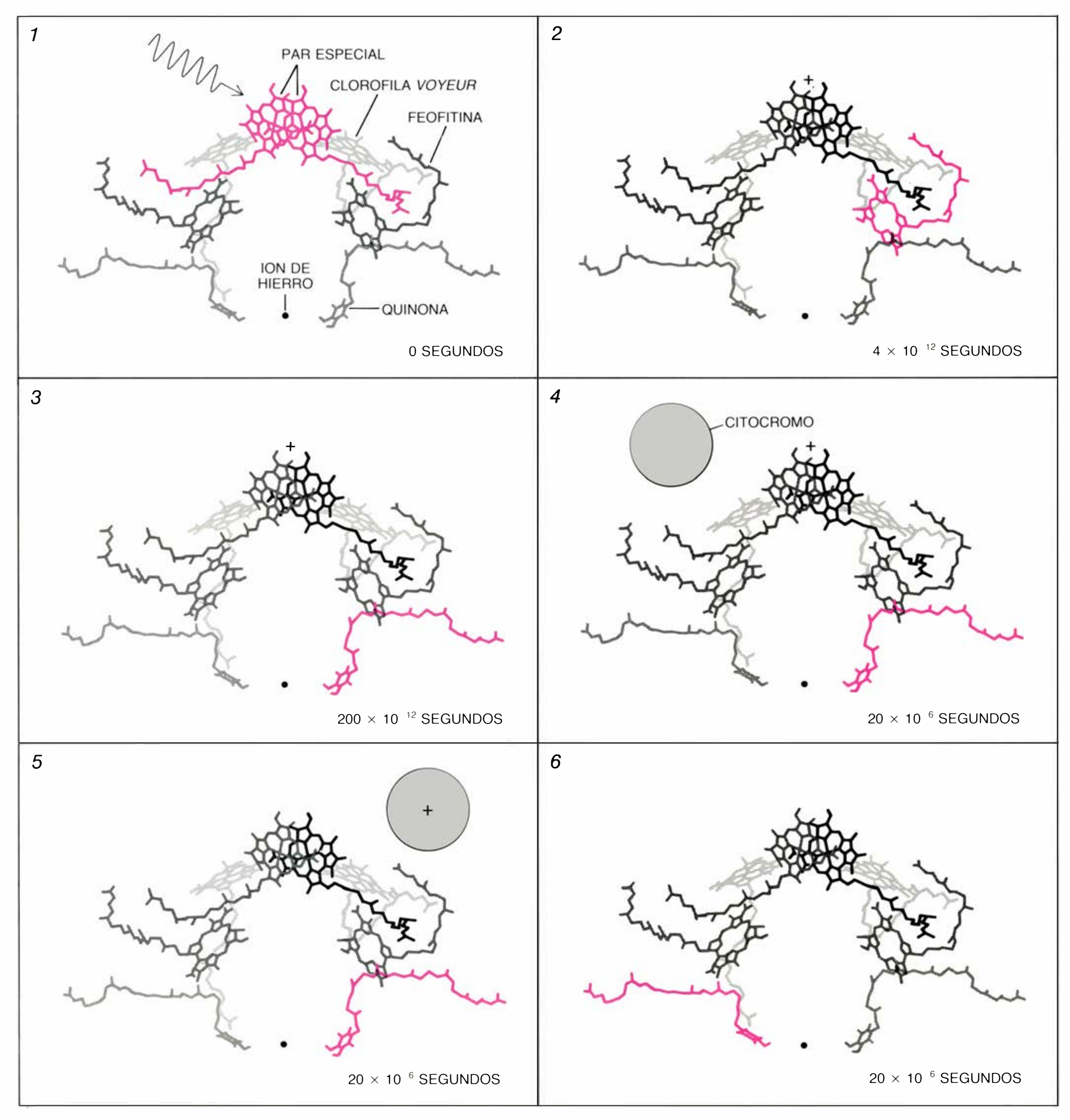


3. ESTRUCTURA FISICA del centro fotosintético de reacción bacteriano, representada en imágenes de ordenador según se determinó aplicando técnicas de cristalografía de rayos X. La figura superior muestra el centro fotosintético de reacción entero que, en su mayor parte, está constituido por un complejo proteico (*azul*). La imagen inferior recoge las denominadas moléculas prostéticas, o auxiliares, insertadas en la proteína. A su vez, la propia proteína está embebida en una membrana (no aparece aquí) que forma parte de una estructura bacteriana interna denominada vesícula fotosintetizadora. El "par especial" de moléculas de clorofila que absorbe la energía de los fotones (cuantos de energía luminosa) se ha coloreado de amarillo. Otras moléculas de clorofila, denominadas moléculas *voyeur* (ya que, pese a su proximidad, resulta probable que no intervengan en algunas reacciones de la fotosíntesis) se presentan en verde. Las moléculas de feofitina se indican en magenta y, las de quinona, en naranja. La pequeña mancha amarilla cercana a la base del centro de reacción de la fotosíntesis representa un ion, o átomo cargado, de hierro. Las posiciones y orientaciones indicadas en algunas partes de las moléculas prostéticas son aproximadas, ya que todavía no se han determinado las coordenadas exactas. Las imágenes son obra de Chong-Huan Chang, David M. Tiede, James R. Norris, Jr. y Marianne Schiffer, del Laboratorio Nacional Argonne, de los Estados Unidos.

solubles en agua, pero hasta hace muy poco los investigadores no disponían de los métodos adecuados para cristalizar proteínas de membrana insolubles en agua; a este segundo tipo pertenecen las del centro fotosintético de reacción.

La cristalización de proteínas de membrana ha sido posible gracias a los avances técnicos del diseño y a la utilización de ciertas micromoléculas orgánicas con un extremo hidrófilo (que siente atracción por el agua) y otro hidrófobo (al que le repugna el agua). Por lo que parece, el extremo hidrófobo de esas moléculas puede unirse a las regiones hidrófobas de las proteínas de membrana, lo que permite la exposición de las zonas hidrófilas de las micromoléculas. El conglomerado de proteínas y micromoléculas resultante puede entonces disolverse en una disolución acuosa y posteriormente cristalizarse. Las moléculas proteicas y las micromoléculas cristalizan, juntas, en un proceso denominado de co-cristalización.

En 1983, Hartmut Michel y Johann Deisenhofer, del Instituto Max Planck de Bioquímica de Martinsreid, aplicaron las técnicas antes citadas a la cris-



4. REACCIONES QUIMICAS que configuran las primeras etapas de la fotosíntesis; transportan un electrón hasta un extremo del centro de reacción, dejando una carga eléctrica positiva en el otro extremo. En el primer paso de la fotosíntesis (*1*) un par especial de moléculas de clorofila absorben un fotón, cuya energía se transfiere a un electrón del par especial. (En cada etapa se muestran en color las moléculas portadoras de un electrón en forma excitada.) A continuación, el electrón se dirige a la molécula de feofitina (*2*), dejando atrás una molécula de clorofila *voyeur* y quedándose el par especial con una carga positiva. De ahí, el electrón se traslada a la molécula de quinona (*3*) situada al final de la cadena espiral de las moléculas prostéticas. En ese momento, una molécula de citocromo (de estructura globular) que se mueve libremente por la solución se aproxima al par especial y le transfiere un electrón (*4*). La molécula de citocromo queda de ese modo cargada positivamente (*5*) y el par especial se neutraliza. Posteriormente, el electrón excitado que se había trasladado hasta la citada molécula de quinona se transfiere a otra (*6*). La separación del electrón y la región que porta carga positiva constituye una forma de almacenamiento de energía.

talización de las proteínas del centro de reacción de las rodopseudomonas y consiguieron determinar su estructura. El trabajo tuvo enorme repercusión. Hasta el presente, el centro de reacción es la única proteína de membrana íntegra cuya estructura se conoce en el nivel de resolución atómica.

La información obtenida en los estudios cristalográficos y el conocimiento alcanzado por los espectroscopistas permite esbozar un cuadro bastante claro, en el espacio y en el tiempo, del comportamiento químico del centro fotosintético de reacción, así como de las reacciones que conducen el electrón de una cara a otra de la membrana.

El principal elemento estructural del centro de reacción es un gran complejo proteico embebido en la membrana. Gran número de micromoléculas, denominadas prostéticas, o auxiliares, (incluidas las moléculas de clorofila) se encuentran, a su vez, parcialmente insertadas en dicho complejo proteico. Las moléculas prostéticas constituyen el circuito conductor eléctrico que siguen los fotoelectrones durante la fotosíntesis.

Uno de los aspectos más notables de esa estructura estriba en su simetría, rotacional, binaria y casi perfecta; en otras palabras, un centro fotosintético de reacción que girase 180 grados, o la mitad de un círculo, sobre su eje central (el eje que va de una superficie de la membrana a la otra), mostraría un aspecto casi idéntico al que no hubiese sufrido rotación. Concretamente, las moléculas prostéticas están distribuidas en dos espirales situadas simétricamente en los lados opuestos de la proteína central. Hay una curiosa y aún no explicada observación experimental: a pesar de su simetría, los electrones parecen seguir, durante la fotosíntesis, sólo una de esas espirales.

El proceso fotosintetizador se inicia cuando un fotón bombardea un par de moléculas de clorofila, el par especial, localizadas en el extremo del centro de reacción más cercano a la superficie interna de la membrana. El par especial se encuentra en el punto de unión de las dos espirales de las moléculas prostéticas. Un electrón del par especial absorbe la energía del fotón y se traslada al grupo prostético vecino, una molécula de feofitina de composición y estructura muy similares a las de la clorofila. En esta etapa del proceso, rapidísima (dura unas cuatro billonésimas de segundo), el electrón pasa cerca de otra molécula de clorofila (denominada, como corresponde, molécula *voyeur*), aunque no parece enlazarse con ella. El par especial queda con un exceso de carga positiva.

A continuación, el electrón se desplaza desde la feofitina hasta una molécula de quinona, que se encuentra al final de la cadena espiral de las moléculas prostéticas, instaladas cerca de la superficie externa de la membrana. Desde esta molécula de quinona, el electrón atraviesa la proteína central hasta la molécula de quinona situada en el extremo de la otra espiral de moléculas prostéticas (la que no conduce los electrones). Este último paso resulta extremadamente lento; su velocidad es unas 10^8 veces inferior a la de las reacciones de transferencia del electrón desde el par especial hasta la molécula de feofitina.

En el ínterin, una molécula de citocromo, de estructura globular y soluble en agua, cede un electrón al par especial y lo neutraliza, quedándose ella a su vez con una carga positiva. A continuación, se repite el proceso entero: otro fotón bombardea el par especial y un segundo electrón se desplaza a lo largo de un brazo espiral hasta una molécula de quinona, atraviesa la proteína central y llega hasta la molécula de quinona situada en el extremo del otro brazo espiral.

La molécula de quinona, que ahora tiene dos electrones de más, se separa de la proteína del centro fotosintético para participar en las etapas finales de la fotosíntesis, que tienen lugar en la superficie externa de la membrana. Además, una segunda molécula de citocromo cede un electrón al par especial y lo neutraliza. Se completa así la separación de carga que almacena la energía de los fotones: dos moléculas de citocromo cercanas a la superficie interna de la membrana han adquirido carga positiva y dos electrones se han desplazado desde la cara interna hasta la externa de la membrana.

Resulta notable la eficacia del centro fotosintético de reacción a la hora de captar la energía de la luz. Así, retiene la energía de entre el 98 y el 100 por ciento de los fotones que absorbe. Su eficacia acumuladora es del 50 por ciento, aproximadamente. La energía almacenada mediante cargas separadas constituye alrededor de la mitad del total de la energía de los fotones estimuladores. La energía restante se pierde en las reacciones que conducen los electrones a lo largo de la cadena de moléculas prostéticas.

La espectroscopía y la cristalografía han ofrecido, por consiguiente, una detallada visión del proceso de la fotosíntesis en las rodopseudomonas. El tercer enfoque desde el que se ha examinado el proceso ha sido el de la genética molecular.

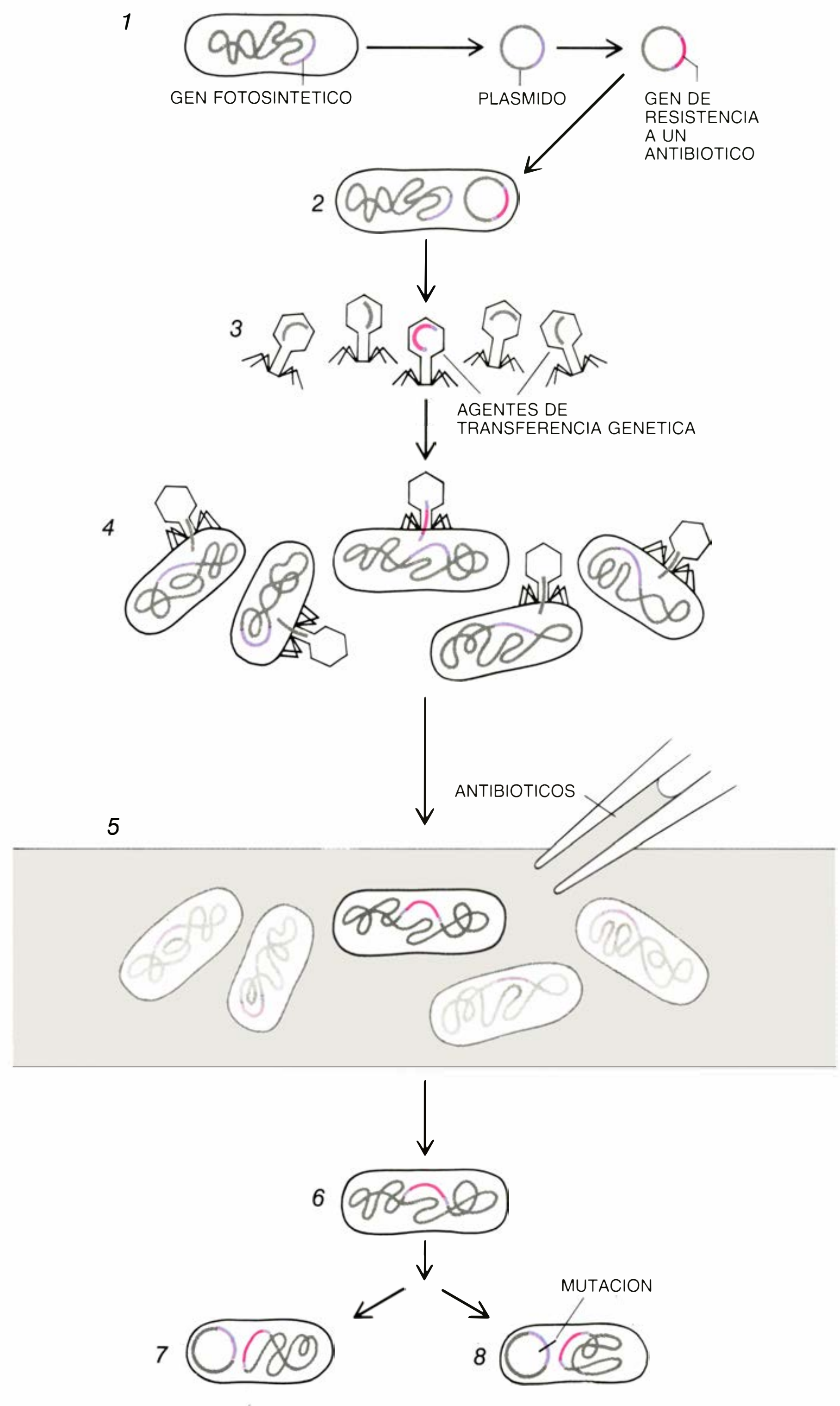
Lo dijimos anteriormente, los genetistas encuentran una gran ventaja en que las rodopseudomonas se desarrollen sin necesidad de recurrir a la fotosíntesis. Tal propiedad permite el cultivo y multiplicación de ejemplares mutantes afectados en los centros fotosintéticos de reacción y, con ello, el estudio del efecto de diversas mutaciones sobre los organismos vivos.

En el análisis genético de un organismo no sólo importa la supervivencia de los mutantes, sino también que entre las células exista algún sistema de transferencia del ADN, material del que están hechos los genes, que posibilite la realización de cruces genéticos. Ello permite la inserción de genes alterados en individuos de la población. Uno de los autores (Marrs) encontró hace unos diez años que la rodopseudomonas *R. capsulata* posee precisamente uno de esos mecanismos. En ocasiones, el material genético de *R. capsulata* se fragmenta en trozos de una longitud que corresponde aproximadamente a cinco genes. Los puntos del cromosoma donde se producen dichos cortes parecen distribuirse al azar y varían de una célula a otra; cada fragmento se empaqueta en una pequeña partícula parecida a un virus. A continuación, la célula se lisa y se liberan los agentes de transferencia genética, que se adsorben a otras células de *R. capsulata* e inyectan el fragmento de ADN que transportan, integrándose seguidamente esos genes en el cromosoma de la célula infectada.

Los agentes de transferencia genética, muy útiles para la realización de cruces genéticos, pueden emplearse también para cartografiar los genes de esa bacteria. Calculando la frecuencia con la que dos genes diferentes se empaquetan en una misma partícula del agente de transferencia genética puede determinarse su proximidad en el cromosoma bacteriano. Dos genes se hallarán a menor distancia cromosómica cuanto mayor sea la frecuencia de empaquetamiento conjunto.

R. capsulata puede también intercambiar material genético por conjugación. Las células bacterianas forman agregados de conjugación gracias a la actuación de unos apéndices superficiales denominados *pili*. En dichos agregados se produce la transferencia de ADN de la célula dadora a la receptora. El proceso resulta también muy útil para efectuar cruces genéticos.

Por medio de esos cruces, uno de los



5. TECNICAS DE GENETICA MOLECULAR que permiten sustituir genes normales por otros alterados y producir de ese modo bacterias cuyo gen para el centro fotosintético de reacción sea defectuoso; posibilitan el análisis de las funciones de los genes modificados. Se inserta en un plásmido (pequeño anillo de ADN) el gen de la fotosíntesis (*púrpura*) obtenido de una bacteria normal (*1*). A continuación se escinde el gen de la fotosíntesis, dejando, sin embargo, las regiones de ADN que lo flanqueaban a su izquierda y derecha e insertándose entre éstas otro gen (*rojo*), que determina resistencia a cierto antibiótico. Seguidamente se introduce el plásmido en una bacteria normal (*2*). La bacteria fragmenta su ADN en pequeños segmentos y los empaqueta en partículas, similares a un virus, denominadas agentes de transferencia genética (*3*). Tales agentes se adsorben a otra bacteria (*4*) e inyectan el ADN que transportan. Ese ADN es capaz de remplazar al gen de la fotosíntesis de la bacteria receptora, dado que el gen de resistencia al antibiótico está situado entre las regiones de ADN que normalmente flanquean al de la fotosíntesis. A continuación se tratan las bacterias receptoras con el antibiótico en cuestión (*5*) para impedir la proliferación de aquellas células que no han captado el gen que codifica la resistencia al antibiótico. Los organismos así seleccionados carecen del gen de fotosíntesis (*6*). Si en esos clones se introduce un plásmido que contenga el gen normal de la fotosíntesis, se recuperará la capacidad fotosintetizadora (*7*), lo que confirmará que las manipulaciones genéticas no han lesionado irreversiblemente la facultad fotosintetizadora de las cepas. Asimismo, se puede introducir un plásmido que contenga un gen fotosintetizador con una mutación (*8*). El análisis de la capacidad fotosintetizadora de las bacterias resultantes permitirá conocer la función del gen alterado. (Dibujos de Dana Burns.)

autores (Marrs) logró, en 1980, aislar en un fragmento de ADN muchos de los genes que contienen la información genética sobre las reacciones fotosintetizadoras. Entre los genes se contaban los que codificaban todas las proteínas del centro de reacción, así como las que constituían una estructura separada, conocida por antena receptora de luz, que colabora en la absorción de la energía de los fotones y la conduce hacia el centro de reacción. Ese fue el primer fragmento de ADN codificador de la información de un centro de reacción que se haya aislado de un organismo fotosintetizador.

Apoyándose en ese trabajo, uno de los autores (Youvan) caracterizó el ADN aislado. Junto con sus colaboradores del Laboratorio Lawrence Berkeley localizó todos los genes del fragmento y determinó la secuencia de nucleótidos (elementos que determinan la constitución específica de la proteína codificada en el gen) de cada uno de ellos. Con dichas secuencias se realizó un análisis computarizado de la estructura de las proteínas que predijo diversos aspectos de la arquitectura global del centro de reacción, visualizado años antes por cristalografía de rayos X. El disponer de la secuencia de nucleótidos del centro fotosintético de reacción de una bacteria permitió su comparación con la secuencia correspondiente en las plantas superiores. La gran similitud entre ambas secuencias indicaba que la constitución de las estructuras fotosintetizadoras era casi universal.

El conocimiento de la constitución del centro fotosintético de *R. capsulata* aporta los elementos necesarios para plantearse una pregunta fundamental: ¿De qué forma específica cooperan los elementos del centro de reacción para desempeñar su función?

Una vía de resolución o respuesta consiste en generar mutaciones sencillas en los genes que codifican los componentes del centro fotosintético. Pueden luego estudiarse, por espectroscopía, los organismos portadores de dichas mutaciones y determinar las diferencias entre su función fotosintetizadora y la de las bacterias no mutadas. Esta línea experimental está ya facilitando información básica sobre ciertos aspectos de la fotosíntesis bacteriana. En algunos casos, la información obtenida es también aplicable a las plantas superiores.

En ese orden, la molécula de quinona de las rodopseudomonas, que en último término recibe los electrones,

actúa en las plantas superiores de una forma similar y en un entorno químico parecido. Recientemente, Feher y sus colaboradores han determinado, mediante rayos X, la estructura de la cavidad proteica del centro de reacción bacteriano al que se une la molécula de quinona. Uno de los autores (Youvan), junto con el alumno de licenciatura Edward J. Bylina, ha provocado mutaciones en dicha región. Algunos de los clones bacterianos resultantes son incapaces de llevar a cabo la fotosíntesis, otros presentan una fotosíntesis parcialmente defectuosa y, por último, un tercer grupo ejecuta con plena normalidad la función fotosintetizadora; el grado de disfunción depende de cada mutación en particular. En algunas cepas mutantes, la función de la molécula de quinona ha sufrido un cambio que las convierte en resistentes a los herbicidas que, como la atrazina, matan a las plantas inhibiendo la función de las moléculas de quinona.

El conocimiento adquirido a través del estudio de las células bacterianas puede resultar de gran utilidad en los trabajos con plantas superiores. Así, podrían conseguirse mutaciones similares a las comentadas en el caso de la resistencia a los herbicidas en los fotosistemas de algunas plantas superiores, como la soja, que son sensibles a la atrazina. Las plantas de soja que, por mutación, hubieran adquirido resistencia a la atrazina podrían sembrarse en campos donde anteriormente se hubiesen cosechado cereales, pues éstos son resistentes de suyo a la atrazina y sus cultivos suelen fumigarse para eliminar las malas hierbas.

En el nivel de la investigación básica, el trabajo con las rodopseudomonas puede revelar datos sobre las propiedades electrónicas fundamentales de diversas proteínas. Mediante manipulaciones genéticas que introdujesen centros de reacción alterados en lugar de los naturales, podrían determinarse la rapidez y la eficacia con las que la nueva proteína conduce los electrones. En esa misma línea podrían diseñarse otros muchos experimentos.

El profundo y detallado conocimiento que subyace a los trabajos comentados es fruto de la colaboración de tres áreas de investigación que a menudo se han considerado independientes. Examinando el problema desde un enfoque distinto, cada grupo de investigadores ha revelado un aspecto diferente del proceso de la fotosíntesis, y ello ha propiciado la visión global de que hoy disfrutamos.

Ciencia y sociedad

Lazos familiares

La evolución del cuerpo humano, a partir de la postura y proporciones simiescas de nuestros primeros ancestros hasta su morfología contemporánea, parecía haber seguido un avance gradual. Un nuevo fósil, descubierto en el desfiladero de Olduvai, sugiere, empero, que esa transición quizás haya sido abrupta. Los investigadores que trabajan en el arenoso yacimiento fosilífero del este de la llanura del Serengueti, Africa, han recuperado fragmentos óseos que revelan las proporciones de un homínido que vivió hace 1,8 millones de años. Aun cuando 200.000 años después sus descendientes ofrecerían un aspecto indudablemente humano, la "saludable anciana" reconstruida a partir de esos fragmentos se parece mucho más a los primitivos homínidos, de brazos largos.

El "homínido de Olduvai 62" (OH 62) constituye un montaje de más de 300 piezas de hueso recuperadas el verano de 1986 por un equipo encabezado por Donald C. Johanson, que dirige el Instituto sobre los Orígenes Humanos, de Berkeley, California, y Tim D. White, de la Universidad de California en Berkeley. En su relato del descubrimiento, los investigadores explican en *Nature* que hallaron fragmentos óseos del cráneo, brazos y piernas erosionados en horizontes cuya antigüedad se remonta a 1,8 millones de años. Los huesos aparecieron dispersos por la superficie y probablemente habían estado expuestos durante siglos.

En la reconstrucción del cráneo los científicos reconocieron el perfil de un homínido perteneciente a la especie *Homo habilis*, que surgió en Africa oriental hace unos dos millones de años. Se conocen muchos de esos cráneos, pero los huesos de las extremidades de OH 62 ofrecieron los primeros indicios sobre la altura y las proporciones de *H. habilis*.

Sorprendió el carácter ancestral de sus rasgos. *H. habilis* apareció más de un millón de años después de la famosa Lucy, de ahí que los antropólogos le supusieran una construcción más afín a *H. sapiens* que a *Australopithecus afarensis*, la especie de Lucy. Los restos de OH 62 guardan, por el contrario, una estrecha semejanza con los de ésta. De alrededor de un metro de altura, OH 62, una hembra que probablemente murió a la edad madura de 30 años, medía lo que Lucy y, como en ésta, los brazos resultaban bastante largos en proporción a su altura.

Johanson y White señalan que la altura puede variar notablemente en una misma especie de homínido, pero que rara vez es ese el caso de las proporciones fundamentales del cuerpo. Por consiguiente, según parece, dejando de lado la expansión de la capacidad craneana, la evolución de los homínidos se mantuvo estacionaria durante más de un millón de años. Además, los ancestros de los seres humanos debieron experimentar un tremendo impulso de crecimiento durante los siguientes 200.000 años. Hace 1,6 millones de años *Homo erectus* ya había suplantado a *H. habilis* en el este de Africa; los fósiles de hembras de *H. erectus* indican que su altura era de 1,5 metros o más; los nudillos ya no les colgaban hasta las rodillas.

Los restos de OH 62 suscitan dos preguntas: ¿por qué se conservaron inmutables los homínidos durante tanto tiempo y por qué cambiaron luego tan rápidamente? Según Johanson, la persistencia de rasgos propios de Lucy probablemente no fue incidental; los brazos largos permiten trepar, y, en un ambiente hostil, los árboles ofrecen varias ventajas: acceso a comida, una vía de escape de depredadores y un lugar razonablemente seguro donde pasar la noche.

De hecho, a Johanson le interesa más el importantísimo período comprendido entre hace 1,8 y 1,6 millones

*PROPORCIONES RELATIVAS de los homínidos ancestros del hombre, representados en su árbol genealógico. Los huesos de brazos y piernas de OH 62 sugieren que las proporciones corporales cambiaron escasamente en los 1,4 millones de años que separan a Lucy (***A. afarensis***) de OH 62 (***H. habilis***), para modificarse luego de modo notable entre hace 1,8 y 1,6 millones de años, coincidiendo con la aparición de* **H. erectus**.

de años, durante el cual los homínidos abandonaron los árboles para caminar sobre el suelo. El incremento de los niveles de inteligencia y el empleo de útiles de piedra podrían explicar esas modificaciones anatómicas y de la conducta, pero el autor no descarta la posibilidad de que la alteración del entorno físico obligara a una existencia terrestre. "Algo importante ocurría en Africa" durante ese intervalo de 200.000 años, opina Johanson, quien tiene planeado centrar sus trabajos en el período que asistió a tantos cambios del hombre primitivo.

Doble problema

Precisamente cuando parecía haberse agotado el lote de sorpresas de la supernova 1987A, surge otra. En observaciones efectuadas con detectores luminosos muy sensibles parece que el brillante fogonazo descubierto en el hemisferio Sur el 24 de febrero pasado posee una acompañante tenue. En opinión de los teóricos, resulta difícil imaginar que una explosión estelar genere dos fuentes luminosas. "Igual que otros, he aportado mis hipótesis", comenta Jeremiah P. Ostriker, de la Universidad de Princeton, "pero ninguna de ellas me parece decisiva".

Dos grupos, uno del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, de Cambridge, Massachusetts, y el otro del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología, de Londres, informan, independientemente, sobre el fenómeno. Las pruebas se han obtenido en sus observaciones con interferómetros de mota, que registran en forma digital el tiempo de llegada y la posición de los fotones que chocan contra una rejilla. Esos datos, una vez sometidos a exhaustivos tratamientos informáticos, permiten a los investigadores localizar el origen de fuentes de luz con precisión sin igual.

Los científicos del Smithsoniano, los primeros en revelar el hallazgo, instalaron, durante dos noches, su interferómetro en el telescopio de cuatro metros del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, Chile: el 25 de marzo y el 2 de abril. Tras varias semanas de análisis de los datos, el grupo anunció que había distinguido una fuente luminosa en el extremo rojo del espectro visible, a un segundo de arco de 1987A. Suponiendo que la Gran Nube de Magallanes, la pequeña galaxia donde explotó la supernova 1987A, se encuentre a unos 150.000 años-luz de la Tierra, la distancia correspondería a unos 400.000 millones de kilómetros. Para abrir esa distancia en un mes (aproximadamente el tiempo transcurrido entre la aparición de 1987A y las lecturas), los dos objetos deben separarse a velocidades próximas a la mitad de la de la luz.

De acuerdo con el informe del Smithsoniano, la acompañante es unas tres magnitudes más débil que 1987A, cuya magnitud al avistarla era algo inferior a 4 (la magnitud del Sol es 1). Aun siendo considerablemente más tenue que 1987A, la acompañante resulta mucho más luminosa que cualquier objeto detectado en esa región antes de la aparición de la supernova.

En busca de confirmación de sus resultados, el equipo de astrofísicos se puso en contacto con sus colegas del Colegio Imperial, que analizaban los datos interferométricos obtenidos en el Telescopio Anglo-Australiano de Siding Spring, Australia. Aunque no había terminado los análisis, el grupo británico informó al poco del hallazgo de pruebas de la fuente acompañante en observaciones efectuadas el 14 de abril. Igual que el equipo norteamericano, el británico sólo distinguía la tenue imagen en el extremo rojo del espectro visible; ninguno de los equipos localizó la acompañante en los registros tomados en longitudes de onda del azul.

Los astrónomos postulan que la imagen más débil podría haberse formado de diversos modos: por un "eco de luz" rebotado en una nube de gas emitida desde la estrella madre antes de explotar; o por una tenue compañera de la progenitora que se excitó al quedar expuesta a la intensa radiación de la supernova; por cierta asimetría de la explosión, que escindió en dos la estrella; por un púlsar, resto de una supernova, que emitiera un haz a través de una "ventana" de la envoltura de expansión; o por un objeto de gran masa cuyo campo gravitatorio actuara de lente, que separaría la imagen de 1987A. Los científicos opinan que sólo ulteriores investigaciones determinarán la verosimilitud de cualquiera de esas hipótesis.

Conmutador del crecimiento

El desciframiento del control genético de la división celular viene constituyendo la piedra filosofal de los biólogos moleculares, pues resulta fundamental para el desarrollo y sustitución hística normales, y no menos para los diversos procesos de crecimiento patológico que se resumen en la palabra cáncer.

Los genes humanos que gobiernan los sucesivos procesos del ciclo celular se han mostrado, empero, especialmente resistentes al análisis. Por fin, en la Fundación Imperial para Investigaciones Oncológicas de Londres se ha aislado un gen humano que, según parece, desempeña un importante papel en el control de la división celular.

La identificación de ese gen, obra de Melanie G. Lee y Paul Nurse, no se realizó estudiando su actividad en las células humanas, sino al descubrirse que ponía en marcha la división en las levaduras. Se sabía que las células de levadura que presentan cierta mutación de un gen (*cdc2* en la levadura *Schizosaccharomyces pombe*) dejan de dividirse en dos momentos característicos de la mitosis celular; sin duda la proteína que determina ese gen interviene de una manera decisiva en esos instantes. Los científicos londinenses decidieron emprender la búsqueda del gen humano que determina una proteína análoga, sirviéndose de pruebas de complementación: localizar un gen humano que efectúe la labor que no puede llevar a acabo el gen de levadura mutado. Sospechaban que un proceso de la trascendencia de la división celular estaría controlado de modo similar en las células animales y vegetales.

Lee y Nurse informan en *Nature* que, por fortuna, *S. pombe* expresa los genes de una "genoteca" humana de ADNc muy utilizada; es decir, la maquinaria de síntesis proteica de la levadura es capaz de leer el ADN humano y traducir su mensajero a proteína. Los científicos lograron que células de *S. pombe* con *cdc2* defectuosos admitieran y expresaran cualquiera de los miles de genes humanos que componen la genoteca y seleccionaron las células de levadura que lograban dividirse y multiplicarse. De esas células aislaron el ADN humano que se había incorporado: el equivalente humano del *cdc2*.

La secuencia de ADN del *cdc2* de levadura y su equivalente humano resultaron ser muy similares. Según señala Robert A. Weinberg, del Instituto Whitehead de Investigaciones Biomédicas del Instituto de Tecnología de Massachusetts, esa escasa variación de la secuencia, a lo largo de los mil millones de años transcurridos desde que los ancestros de la levadura y del hombre tomaron sendas evolutivas distintas, resalta la enorme importancia de esos genes. Ambos determinan proteínquinasas moderadamente pesadas, enzimas que añaden grupos fosfato a otras proteínas. Se sospechaba ya que esas enzimas desempeñaban un importante papel en la división celular y que ciertos cánceres podrían atribuirse a una actividad deficiente de las mismas.

Observatorios de ondas gravitatorias

La teoría de la relatividad general de Einstein sugiere que la Tierra está bañada por ondas gravitatorias procedentes de estrellas distantes. Los observatorios proyectados para la próxima década podrían detectar las señales extragalácticas

Andrew D. Jeffries, Peter R. Saulson, Robert E. Spero y Michael E. Zucker

La teoría de la relatividad general de Einstein sugiere que la Tierra recibe un baño continuo de energía que se origina en las interacciones gravitatorias de estrellas distantes. De acuerdo con dicha teoría, la energía liberada por una perturbación cósmica, tal como la explosión de una estrella, viaja alejándose de ella a la velocidad de la luz en forma de ondas gravitatorias. En su avance, las ondas distorsionan la morfología de cualquier región del espacio que atraviesen. La medición de los movimientos de masas de prueba, cuidadosamente aisladas, debería permitirnos la detección de las ondas.

Desgraciadamente, las perturbaciones del espacio, demasiado débiles, no pueden registrarse con los instrumentos al uso y los detectores de ondas gravitatorias construidos y perfeccionados a lo largo del último cuarto de siglo no han notado hasta ahora el paso de las ondas. La dificultad que presenta la detección de ondas gravitatorias puede parecer sorprendente a quienes vivimos habituados a la gravedad estática observando la caída de los objetos, el movimiento orbital de los planetas u otras experiencias diarias. Sin embargo, ninguno de esos fenómenos guarda relación con masas cuya magnitud y velocidad generen ondas apreciables. Las primeras señales que se detecten vendrán, probablemente, de objetos astrofísicos lejanos, de mayor masa que el Sol y que se muevan a velocidades próximas a la de la luz.

Se está proyectando una nueva serie de experimentos mucho más sensibles con el fin de detectar ondas gravitatorias. Los observatorios de ondas gravitatorias hoy en proyecto podrían registrar señales gravitatorias extragalácticas a principios del decenio de 1990. Se han construido y sometido a prueba, en los Estados Unidos y Europa, prototipos de tales detectores, que se basan en la interferometría láser. En los Estados Unidos, los autores del artículo están trabajando en grupos dirigidos por Ronald W.P. Drever, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, con la misión de construir un par de grandes interferómetros en puntos opuestos del continente, uno en el desierto de Mojave, California, y el otro en Columbia, Maine. Los dos instrumentos se hallarán electrónicamente conectados para operar como un solo observatorio: el observatorio de ondas gravitatorias por interferometría láser (LIGO, de *Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*). Aunque cada instrumento multiplicará por mil la sensibilidad del mejor detector existente, el coste de la pareja vendrá a ser el de un telescopio óptico grande, unos 60 millones de dólares.

El panorama del universo que esperamos nos revele el LIGO y otros observatorios similares, amén de desconocido, diferirá cualitativamente del universo que nos ha ido ofreciendo la astronomía tradicional. Hasta el decenio de 1930, las ondas electromagnéticas de frecuencia óptica, esto es, de luz visible, constituían la única herramienta para estudiar el cosmos. La visión electromagnética del universo adquirió un espectacular impulso con el advenimiento de la radioastronomía; la apertura de las ventanas infrarroja, de rayos X y de rayos gamma provocó ulteriores avances. Aunque cada forma de energía electromagnética da una película distinta del universo, las ondas gravitatorias transportan una clase de energía enteramente diversa y, por tanto, una nueva clase de información acerca de sus fuentes. Los observatorios gravitatorios podrían revolucionar el panorama del universo.

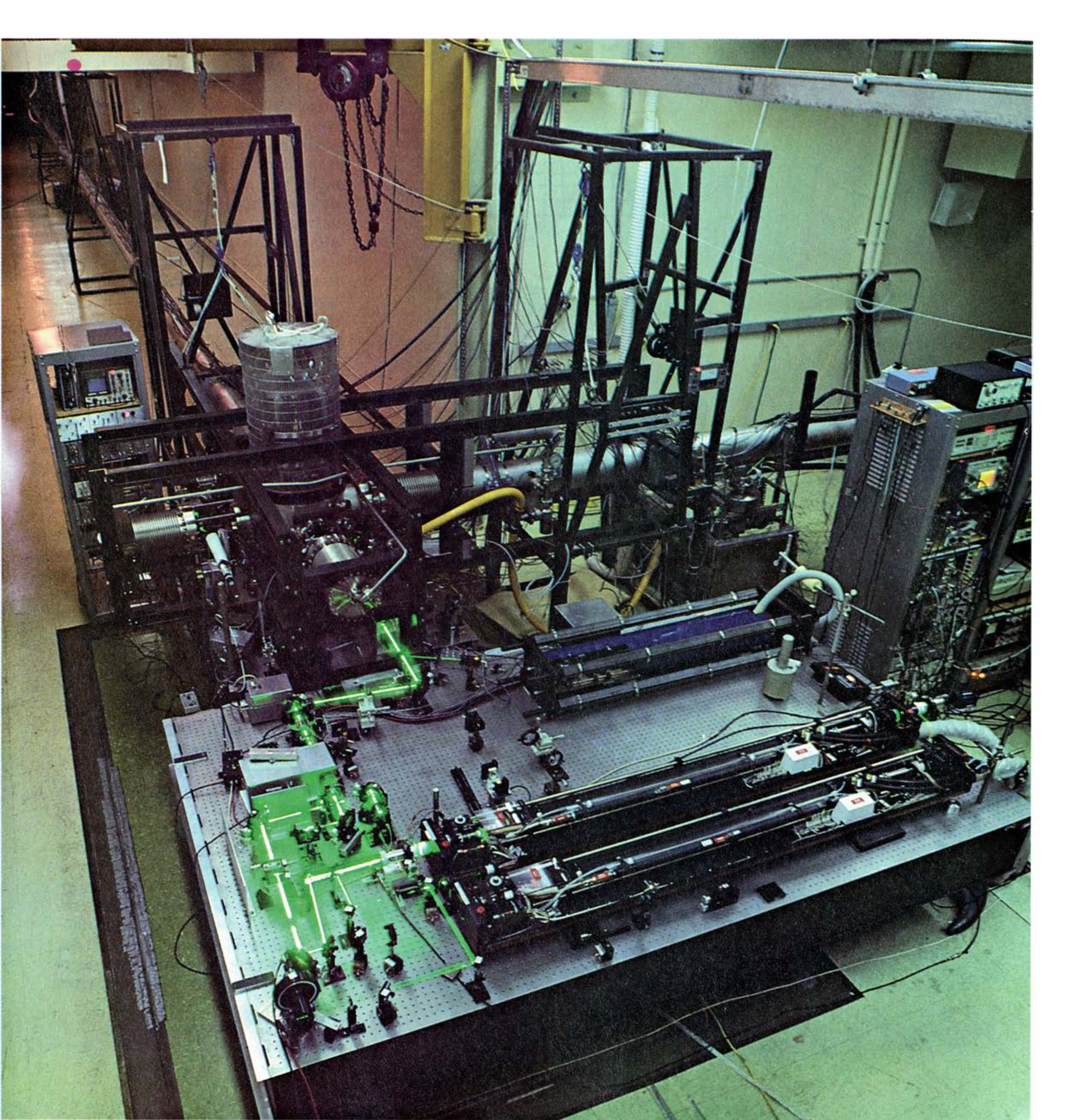
Además, la demostración de la existencia de las ondas gravitatorias corroboraría directamente las predicciones de la relatividad general. De importancia central en la relatividad es el principio de que ninguna señal puede viajar a velocidad superior a la de la luz. En la teoría de la gravedad de "acción a distancia", de Newton, por el contrario, los campos gravitatorios variables se propagarían a velocidad infinita. La simple comprobación de que las ondas gravitatorias viajan a la velocidad de la luz prestaría una valiosa ayuda al punto de vista de Einstein.

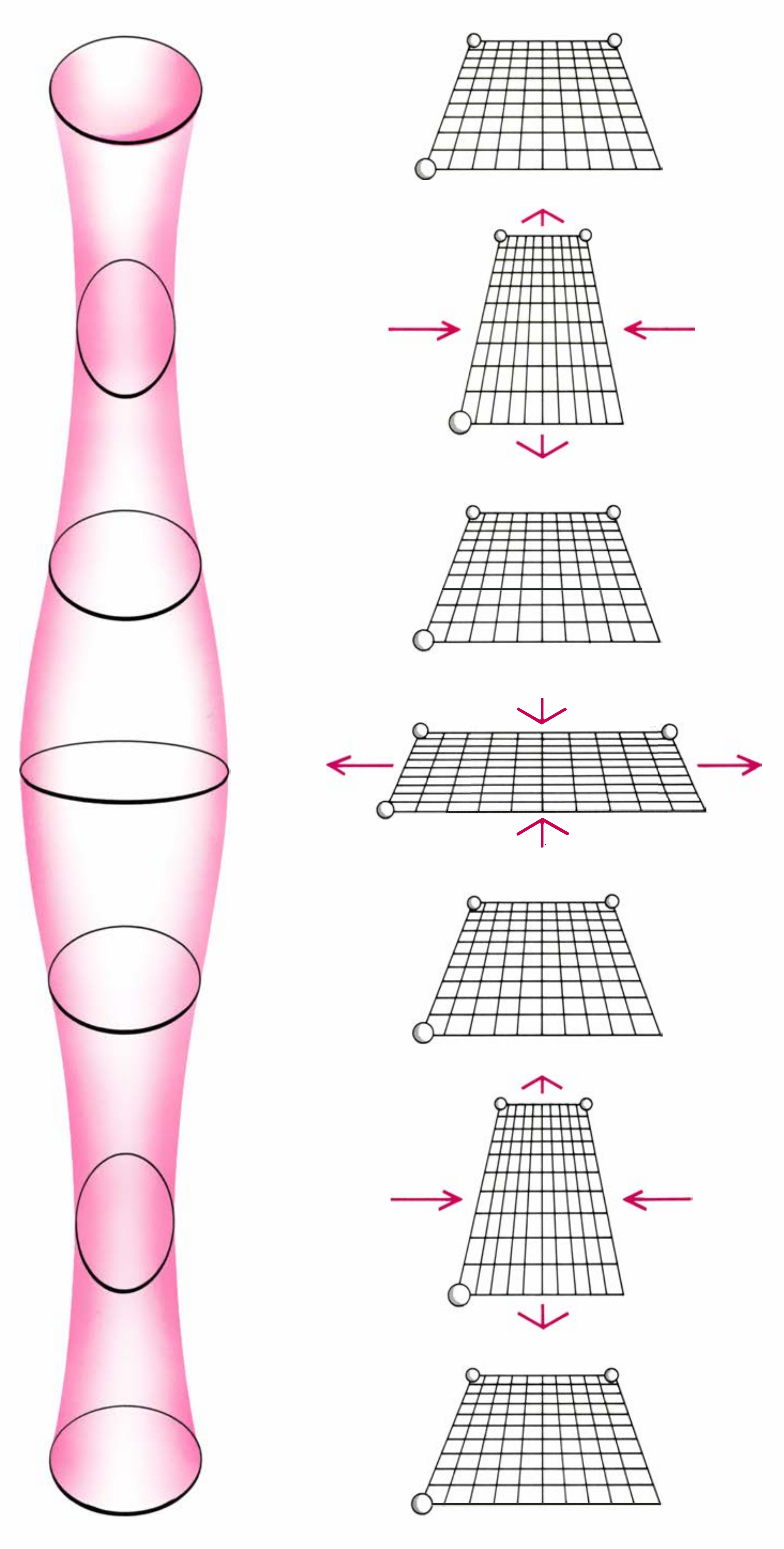
Para entender cómo afectan las on-

1. DETECTOR DE ONDAS GRAVITATORIAS instalado en el Instituto de Tecnología de California. Sirve de prototipo para observatorios mayores que habrán de construirse en el próximo decenio. Consta de un interferómetro de láser alojado en dos tubos donde se ha hecho el vacío, dispuestos en ángulo recto y que se prolongan en dos corredores de 40 metros. Mediante espejos y fibras ópticas, el haz láser de la parte anterior se envía hacia un tanque donde se ha practicado el vacío (*izquierda del centro*); contiene éste un divisor de haces, o espejo parcialmente reflector, que reparte equitativamente la luz entre ambos tubos. La luz se refleja en los espejos montados sobre masas libremente suspendidas al final de cada tubo. El haz luminoso va y viene recorriendo el laboratorio unas 10.000 veces. Se registra la interferencia producida. Cualquier onda gravitatoria que pasara alteraría ligeramente el intervalo que media entre uno o ambos pares de masas y, con ello, variaría la interferencia. El aparato es sensible a variaciones de duración de hasta un milisegundo y longitud de hasta 3×10^{-16} metros, lo que representa una tercera parte del diámetro de un protón. En el MIT hay un interferómetro de 1,5 metros y otro de cinco metros, este último en fase de construcción.

das gravitatorias a la materia, supongamos una de ellas propagándose por el espacio; e imaginemos un tubo de goma largo y flexible, colocado según la dirección de propagación de la onda. Al principio, el tubo tiene sección circular. Pero a medida que la onda se mueve a lo largo del tubo, va deformando su sección, hasta convertirla en elíptica; el eje mayor aumenta en una fracción del diámetro original, mientras que el eje menor se contrae en la misma fracción. Medio periodo mas tarde, se intercambian los ejes, y así se forman ondulaciones en la superficie del tubo. Una vez que la onda ha pasado, el tubo recupera su forma original.

¿Cómo afectaría esa onda a una capa de masas que se hallaran igualmente espaciadas y suspendidas en un plano? Supongamos que el plano es horizontal y que la onda se mueve perpendicularmente al mismo. Cuando la onda atraviesa el plano, aumentará primero la distancia entre las masas en una dirección, por ejemplo norte-sur, y acortará las distancias en la dirección perpendicular, que en este caso sería este-oeste. La variación del intervalo entre masas caracteriza la amplitud de la onda. Si ésta continúa moviéndose a través del plano, el ensanchamiento y estrechamiento se invierten periódicamente: los intervalos en la dirección norte-sur y en la este-oeste aumentarán y disminuirán alternativamente. Los efectos inducidos por las ondas son transversales a la dirección de propagación, de manera que una onda que avance hacia el oeste alterará el espa-





2. EFECTOS DE UNA ONDA GRAVITATORIA representados para un tubo de goma que flotase en el espacio (*izquierda*) y para un conjunto de masas sobre un plano (*derecha*). Las ondas gravitatorias deben alterar cualquier región que atraviesen. Hemos supuesto aquí que la onda se propaga verticalmente.

ciado en dirección norte-sur, no en dirección este-oeste.

La generación de ondas gravitatorias recuerda, en varios aspectos, la generación de ondas electromagnéticas. Las primeras difieren de la atracción gravitatoria estática de igual manera que la luz y las ondas de radio difieren de la electricidad estática y el magnetismo. Un objeto cargado y en movimiento radia ondas electromagnéticas con amplitud proporcional a la carga eléctrica y la aceleración del objeto. La carga gravitatoria de un objeto es su masa; y así, la amplitud de una onda gravitatoria debe ser proporcional a la masa del objeto y a su aceleración. Pero la ley de conservación de la cantidad de movimiento exige que los sistemas aislados no tengan aceleración neta; por cada acción hay una reacción igual y opuesta. La mayoría de las ondas emitidas por una masa acelerada se anulan con las procedentes de un objeto en retroceso. La anulación, sin embargo, no es perfecta porque los objetos no están exactamente en el mismo lugar. La ligera diferencia de posición de los objetos significa que las ondas llegan en distintos instantes, lo que posibilita la fuga de parte de la radiación gravitatoria.

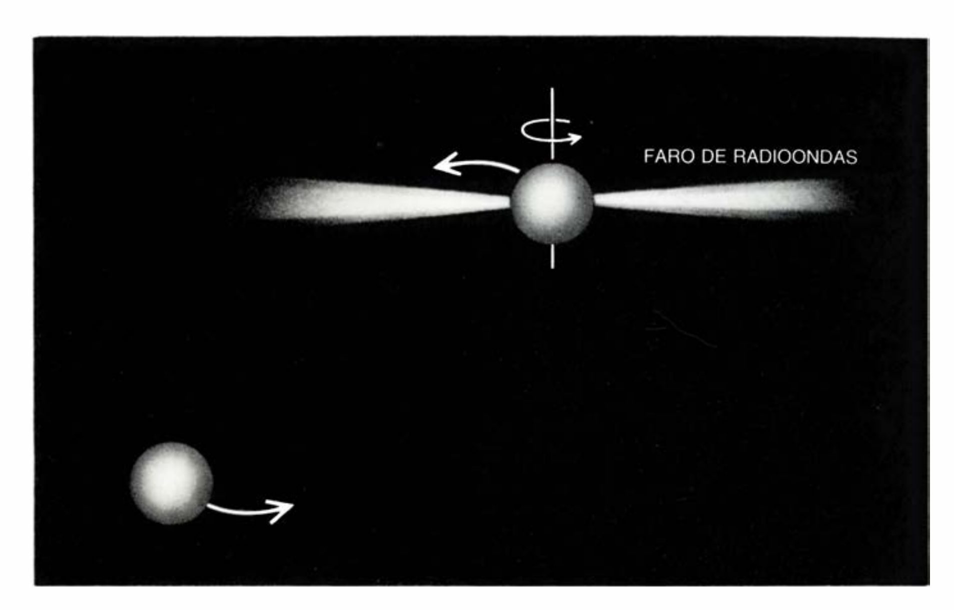
La cantidad de radiación gravitatoria que escapa de un objeto depende de la irregular distribución de la masa de aquél. Mide esta irregularidad la magnitud conocida por momento cuadripolar; un balón de fútbol no tiene momento cuadripolar, pero uno de rugby posee un momento cuadripolar grande. Cuando un objeto de gran masa experimenta rápidas variaciones en su momento cuadripolar, emite intensas ondas gravitatorias. La masa y velocidad del objeto, sin embargo, deben ser enormes; una barra de acero de 500 toneladas que girase con una celeridad tal que la pusiera al borde de la desintegración generaría unas ondas gravitatorias que apenas deformarían un sistema de prueba en una parte en 10^{40}. Indudablemente, se trata de una variación mínima para poder observarla.

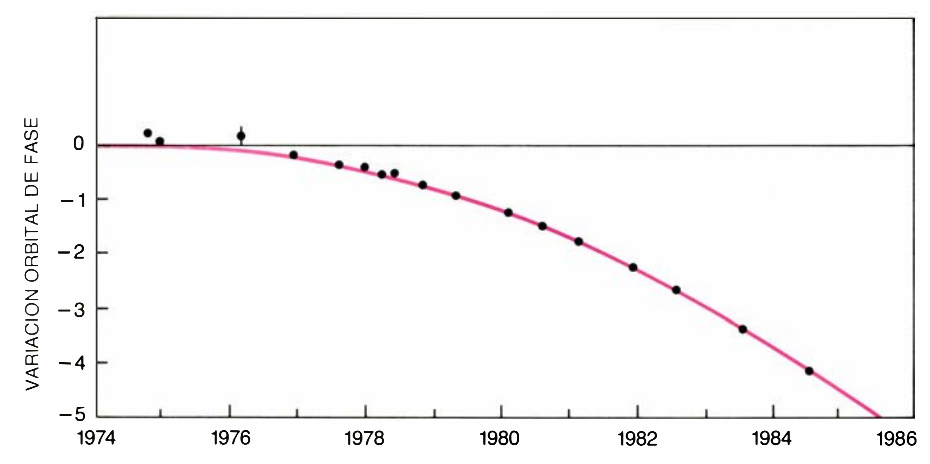
Las estrellas y otros objetos astrofísicos deben emitir ondas gravitatorias mucho más intensas que las ondas procedentes de cualquier fuente imaginable en la Tierra. Un sistema binario de estrellas –dos estrellas que giran en torno a su centro de masas común– debe producir ondas gravitatorias continuas con un periodo igual a la mitad del periodo orbital (ya que el momento cuadripolar toma dos veces

el mismo valor en cada órbita). Casi la mitad de las estrellas están emparejadas en sistemas binarios. Estos presentan un momento cuadripolar grande y variable, y la radiación gravitatoria que generan puede predecirse con precisión. Las más intensas de las ondas gravitatorias emitidas por sistemas binarios habrían de inducir una deformación de una parte en 10^{20} en la Tierra, veinte órdenes de magnitud mayor que la deformación inducida por la barra de acero de 500 toneladas en rotación.

De las estrellas binarias conocidas hay una pequeña fracción formada por dos estrellas de neutrones en órbitas muy próximas. Una estrella de neutrones es un objeto constituido casi exclusivamente por estas partículas, con una masa del tamaño de la solar y un radio, sin embargo, de sólo unos 10 kilómetros. La estrella de neutrones es a veces visible en forma de púlsar: una radiofuente que parece emitir y apagarse al girar sobre su eje como si se tratara de un faro costero que barre el horizonte con su haz luminoso.

En 1974, Joseph H. Taylor, Jr., y Russell A. Hulse, entonces en la Universidad de Massachusetts en Amherst, descubrieron un púlsar en un sistema binario caracterizado por un período orbital de ocho horas. Aunque sólo una de las estrellas es púlsar, los estudios de sus órbitas revelan que su compañera constituye también una estrella de neutrones. Registrando los tiempos de llegada de las señales procedentes del púlsar, Taylor y sus colaboradores cartografiaron, con gran precisión, las órbitas de las dos estrellas de neutrones. Hallaron que el periodo del sistema binario decrecía gradualmente, lo que significaba que las dos estrellas de neutrones se estaban acercando, en espiral, entre sí. La pérdida de energía observada concuerda, en cabal precisión, con la pérdida predicha por radiación gravitatoria del sistema; es decir, las ondas gravitatorias se llevarían consigo la cantidad de energía y cantidad de movimiento requeridas para producir el efecto observado. La verdad es que la predicción teórica concuerda con las medidas en torno al uno por ciento. La impresionante concordancia entre la teoría y el experimento constituye una prueba sólida a favor de la existencia de radiación gravitatoria.





3. PRIMER INDICIO DE ONDAS GRAVITATORIAS, procedente de un púlsar binario descubierto en 1974 por Joseph H. Taylor, Jr., y Russell A. Holse, en la Universidad de Massachusetts. Un púlsar binario consta de dos estrellas que describen órbitas en torno a su común centro de masa (*arriba*), siendo una de las dos estrellas un púlsar: una radiofuente que parece dar destellos y apagarse a medida que gira sobre su eje. El período orbital del púlsar binario, cifrado en ocho horas, decrece lentamente (*abajo*). El decrecimiento, que se mide registrando el tiempo de llegada de las señales de radio del púlsar, implica que las estrellas aparejadas pierden gradualmente energía y van acercándose entre sí. La pérdida de energía observada (*puntos*) concuerda con la pérdida predicha para el sistema por la teoría de la radiación gravitatoria (*curva*); las ondas gravitatorias eliminarían del sistema la cantidad correcta de energía y momento cinético.

Cuando un sistema binario muere, las estrellas que lo componen describen espirales que convergen rápidamente hasta que entran en colisión o saltan hechas añicos. En el caso de las estrellas de neutrones, cualquiera de los dos sucesos producirá un intenso brote de ondas gravitatorias. El púlsar binario tardará en sufrir ese sino 100 millones de años o más, pero la Vía Láctea y otras galaxias de su índole alojan suficientes sistemas binarios de neutrones para que cada 1000 años se fundan varios pares. Pero esperar todo un milenio es mucho esperar. De ahí que se quiera dotar al proyecto LIGO de sensibilidad suficiente para detectar señales procedentes del cúmulo de Virgo y otros cúmulos de galaxias próximos, y registrar varios sucesos por año que produzcan deformaciones de una parte en 10^{22}.

El nacimiento de una estrella de neutrones debe anunciarse también con un brote intenso de ondas gravitatorias. Cuando muere una estrella de gran masa en medio de una brillante explosión, llamada supernova, su núcleo se contrae bruscamente y forma una estrella de neutrones. Aunque queda mucho por recorrer en el conocimiento del colapso, cabe afirmar la posibilidad de que hasta un 0,1 por ciento de la masa de la estrella de neutrones se convierta en ondas gravitatorias. La aparición de una supernova en nuestra galaxia, suceso que acontece aproximadamente una vez cada 30 años, podría crear deformaciones en la Tierra de una parte en 10^{18}, más o menos. La reciente supernova de la Gran Nube de Magallanes, galaxia satélite de la Vía Láctea, habrá producido deformaciones causadas por ondas gravitatorias en torno a una parte en 10^{19}, justamente por de-

FUENTE	CLASE DE SEÑAL	FRECUENCIA	INTENSIDAD
ESTRELLA BINARIA	PERIODICA	1 MEGAHERTZ O MENOR	10^{-21}
ESTRELLA BINARIA DE NEUTRONES	CUASIPERIODICA	BARRIDOS HASTA 1 KILOHERTZ	10^{-22}
ESTRELLA DE NEUTRONES QUE ACUMULA MATERIA	PERIODICA	DE 200 A 800 HERTZ	3×10^{-27}
SUPERNOVA-DE TIPO II	IMPULSOS	1 KILOHERTZ	10^{-21}
AGUJERO NEGRO VIBRANTE	SINUSOIDAL AMORTIGUADA	10 KILOHERTZ PARA UNA MASA SOLAR 10 HERTZ PARA 1000 MASAS SOLARES	?
FORMACION DE GALAXIAS (POR CUERDAS COSMICAS)	RUIDO	BANDA ANCHA 1 CICLO POR AÑO 300 HERTZ	10^{-14} 10^{-24}
GRAN EXPLOSION	RUIDO	?	?

4. POSIBILIDADES DE DETECCION de ondas gravitatorias procedentes de distintas fuentes. A medida que atraviesan la Tierra, imparten un leve impulso a las masas; así las ondas que naciesen de un estrella binaria separarían de sus posiciones todas las masas en sólo 10^{-21} metros por metro de intervalo.

bajo del umbral de sensibilidad de los mejores detectores existentes. Las supernovas del cúmulo de Virgo, que aparecen varias veces a lo largo del año, podrían causar deformaciones de una parte en 10^{21}.

La detección de las ondas gravitatorias procedentes de una supernova podría tener consecuencias de gran alcance. Los investigadores están interesados en medir el tiempo transcurrido desde la detección de las ondas gravitatorias provenientes del núcleo colapsante de una supernova hasta la llegada de las ondas luminosas procedentes de las capas exteriores de la estrella. Si las ondas gravitatorias y las luminosas se detectan simultáneamente, nos hallaríamos con una confirmación directa de la predicción relativista según la cual las ondas gravitatorias se propagan a la velocidad de la luz. Si los telescopios ópticos divisaran una supernova en el cúmulo de Virgo con el margen de un día respecto de la detección del impulso gravitatorio, entonces las velocidades de las dos señales concordarían dentro de un error de una parte en 10.000 millones.

Las ondas gravitatorias generadas por una supernova suministrarían, además, una nueva ventana de observación. La radiación electromagnética producida en el interior profundo del núcleo en colapso queda aprisionada por las capas exteriores de la estrella, ocultando los sucesos más violentos. La detección de un brote de neutrinos procedente de la reciente supernova aparecida en la Gran Nube de Magallanes constituyó una indicación poderosa a favor del modelo de colapso del núcleo; ahora bien, hasta los neutrinos habían sufrido miles de dispersiones en su camino hacia el exterior de la estrella. Las ondas gravitatorias, cuya interacción con la materia es tan débil que pueden escapar sin atenuación a través de la atmósfera estelar, podrían revelar los pormenores del núcleo en colapso. La radiación gravitatoria permitiría también la visión de objetos que nos oculta el polvo interestelar; entre ellos, el centro de la galaxia.

Una estrella de neutrones de edad media constituiría, asimismo, una fuente de ondas gravitatorias si girase alrededor de un eje sin ser perfectamente simétrica. Si la corteza dura de la estrella se condensó en una forma aplastada por la rotación, el encuentro con otra estrella podría alterar el eje de rotación. El bamboleo resultante adquiriría un valor suficiente para crear intensas ondas gravitatorias.

La formación de un agujero negro o el choque de dos de ellos podría generar también una intensa radiación gravitatoria. Los agujeros negros constituyen objetos de increíble densidad, cuya existencia ha sido predicha por la

relatividad general. Según se cree, aparece un agujero negro cuando una estrella en extinción, de excesiva masa para sostenerse a sí misma, colapsa bajo su propio peso, sin dejar otras trazas que su carga eléctrica, su velocidad de rotación y su intensa gravitación, tanta, que ni siquiera la luz puede escapar a su atracción. Si una gran proporción de la masa del universo está oculta, convertida en agujeros negros, es posible que los choques menudeen lo suficiente para que un detector capacitado para la observación de sucesos en estrellas de neutrones esté dotado también para hacer lo propio en agujeros negros. Algunos sistemas de estrellas binarias que producen rayos X encierran, según se cree, agujeros negros; pero sin una sonda gravitatoria es imposible estar seguro. Los observatorios de ondas gravitatorias proporcionarían tal sonda, ya que la radiación gravitatoria emitida por un agujero negro debe llevar un sello característico. La detección de las señales nos ofrecería la única manera conocida, e inequívoca, de demostrar la existencia de objetos dotados de esas extrañas características gravitatorias.

Otra supuesta fuente de ondas gravitatorias es la gran explosión, o explosión primordial que tuvo lugar hace 15.000 o 20.000 millones de años y dio alumbramiento al universo. La información más valiosa acerca del primitivo universo proviene, en parte, de observaciones de la radiación cósmica de fondo en microondas, resto de la radiación térmica que inundó el cosmos en sus comienzos. La detección de un fondo de ondas gravitatorias revelaría nuevos aspectos de la gran explosión. Por ejemplo, las fluctuaciones cuánticas de los primeros 10^{-43} segundos de vida del universo podrían haber dejado una impronta reconocible hoy día. Los vestigios de ondas gravitatorias podrían hablarnos también de los violentos comienzos de la formación de galaxias.

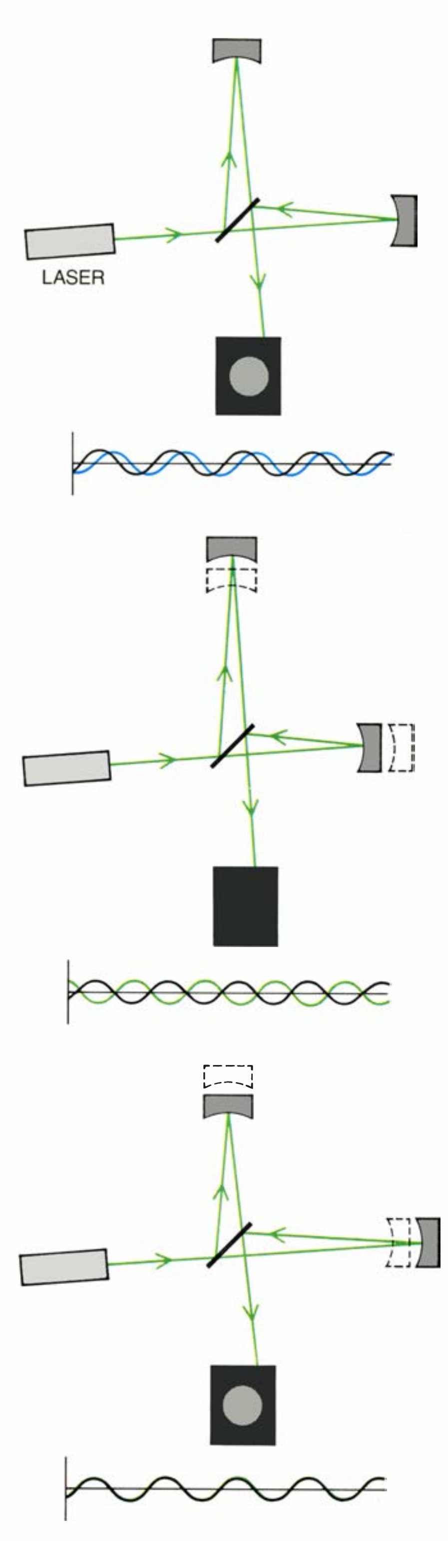
Las ondas gravitatorias producidas en cualquiera de los supuestos anteriores dejarían débiles y efímeras trazas al pasar por la Tierra. Las masas apenas si se perturbarían, cambiando de posición en tal vez 10^{-21} metros (la millonésima parte del diámetro de un protón) por cada metro de separación; las ondas en forma de impulsos, de una supernova quizá, durarían breves milisegundos. ¿Cómo lograr detectar ondas tan débiles?

Los primeros detectores de ondas gravitatorias se deben al trabajo pionero de Joseph Weber, de la Universidad de Maryland en College Park, a principios del decenio de 1960. Los instrumentos constan de barras metálicas aisladas de gran masa. Cada barra es un cilindro sólido, de aluminio. Las barras están construidas de suerte que vibren en respuesta a las ondas gravitatorias. En la actualidad, los mejores detectores son sensibles a desviaciones pequeñísimas: de una parte en 10^{18}. A ese nivel no se han detectado señales.

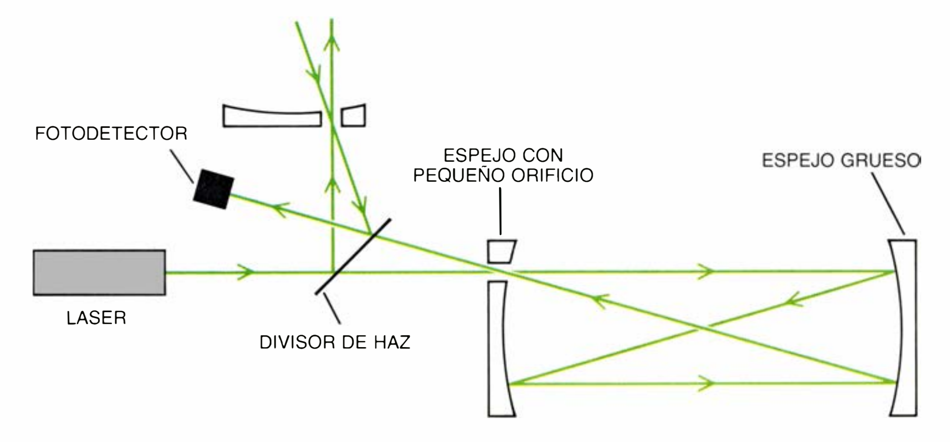
Entra dentro de lo posible obtener mediciones más finas con esas barras, aunque no será tarea fácil. Un primer motivo estriba en la sensibilidad; la de cualquier detector de ondas gravitatorias aumenta con su longitud. Lo que significa que la mayor barra práctica alcanzaría varias decenas de metros de largo. Con el enfoque que nosotros y otros investigadores estamos usando, es posible construir instrumentos de varios kilómetros de longitud. Nos referimos a los detectores interferométricos, que constan de masas separadas y conectadas sólo por haces de luz.

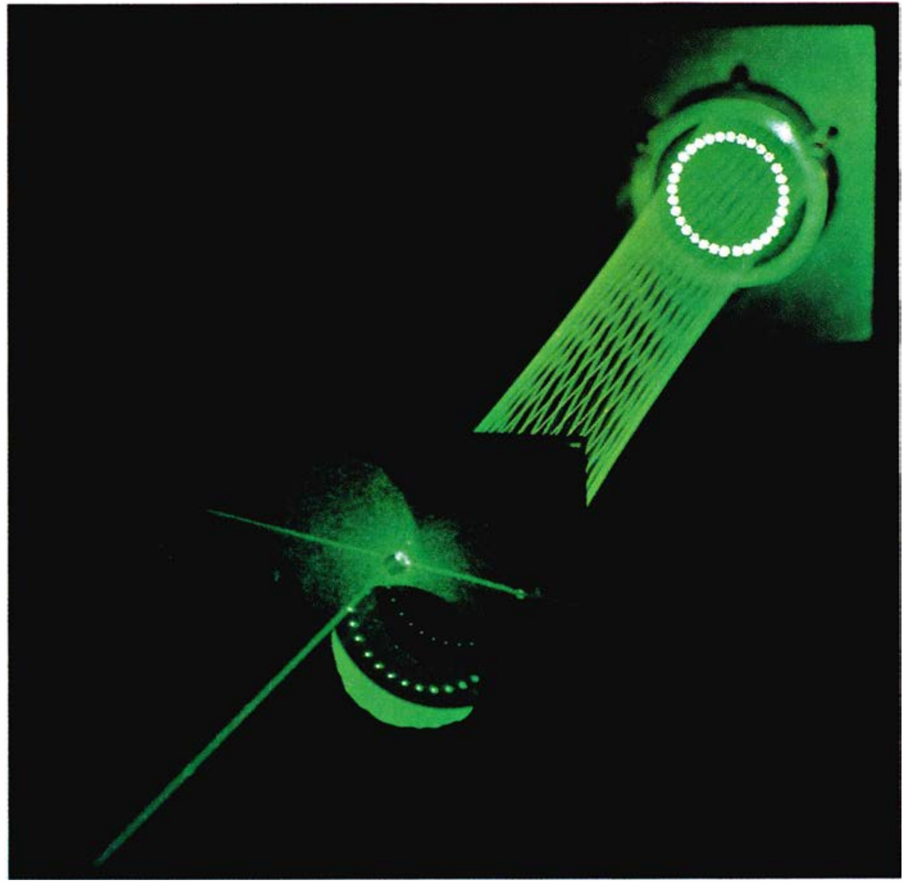
La interferencia es una propiedad asociada a todas las clases de ondas, electromagnéticas incluidas. Las ondas que se desarrollan en el agua ilustran el principio. Imaginemos dos conjuntos idénticos de ondas generadas en la superficie del agua por sendas piedrecillas que hemos arrojado en un estanque. Las ondas avanzan acercándose mutuamente ambos conjuntos. Donde las ondulaciones se cruzan, la altura es la suma de las alturas de las ondas individuales. Cuando una cresta de una onda se encuentra con otra cresta de la otra, la cresta resultante es mayor; cuando una cresta se encuentra con un seno, las ondas se anulan.

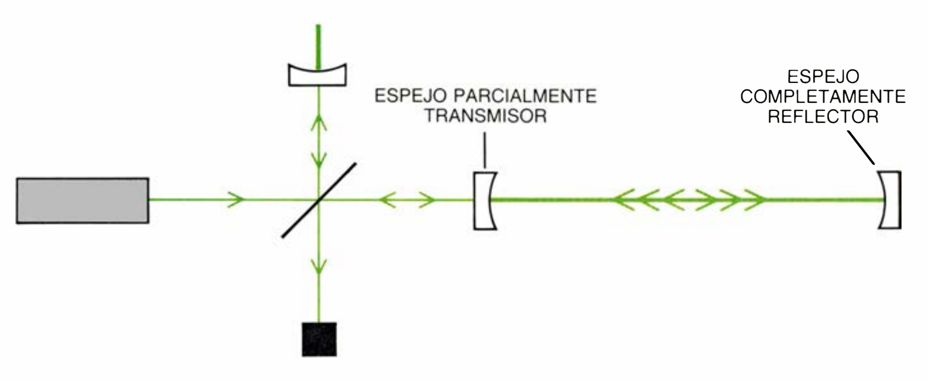
Podemos recurrir a la interferencia para medir la distancia relativa avanzada por dos ondas. Las ondas se sumarán si han recorrido la misma distancia; se anularán, si la diferencia entre sus caminos es de media longitud de onda. El efecto constituye el fundamento de los detectores interferométricos de ondas gravitatorias. Se preparan dos ondas luminosas idénticas mediante un divisor de haces –un espejo parcialmente reflector– que fracciona un haz de láser en dos haces perpendiculares. Estos se dirigen entonces hacia masas suspendidas, capaces de responder a los impulsos gravitatorios. En las masas se montan espejos que reflejan los haces, de suerte que éstos se reúnan en el divisor. El brillo del haz



5. EL INTERFEROMETRO podría servir para detectar ondas gravitatorias. En su expresión sencilla consta de un láser, un divisor de haz, dos espejos que definen dos brazos en ángulo recto y un fotodetector. Aquí se muestra, junto al fotodetector, una gráfica del campo eléctrico de cada haz de luz que retorna, en función del tiempo. Si las longitudes de los dos brazos difieren en un octavo de la longitud de onda, los campos eléctricos de los haces luminosos se recombinan con una diferencia de fase de un cuarto de ciclo, uno respecto del otro; en la ventana de salida (*arriba*) aparece la mitad de la luz. Si la onda gravitatoria altera la longitud del camino en un sentido, la luz interfiere destructivamente en la ventana de salida y ésta es menor (*centro*). Un corrimiento en sentido opuesto hace que la luz interfiera constructivamente y la intensidad de salida es mayor (*abajo*).







6. SENSIBILIDAD DEL INTERFEROMETRO a las variaciones en la separación de sus espejos y, en consecuencia, a las ondas gravitatorias. Podemos aumentar la sensibilidad obligando a los haces de luz a que recorran el camino de ida y vuelta muchas veces. Hay dos configuraciones muy próximas de pasos múltiples. En una línea de demora óptica (*arriba*), la luz entra en un espejo por un orificio, sufre varias reflexiones y sale a través del mismo agujero. Por mor de simplificación, ofrecemos aquí dos viajes completos de ida y vuelta; las líneas de demora en los detectores de ondas gravitatorias realizan docenas de idas y venidas entrecruzadas (*centro*). En una cavidad de Fabry-Pérot (*abajo*), la luz entra a través de un espejo parcialmente transmisor, se refleja en otro y vuelve al espejo de entrada. Allí, se transmite una fracción de la luz y el resto se refleja de nuevo para reanudar el ciclo. El número de reflexiones depende de la calidad del espejo de entrada.

saliente resultante, que es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda combinada, indica la diferencia entre las distancias a la Tierra de ambas masas. Si una onda gravitatoria que se propagase verticalmente incidiera sobre el aparato, la distancia recorrida por uno de los haces se acortaría, y, simultáneamente, el camino recorrido por el otro haz se alargaría. En virtud de ello, cambiaría el brillo del haz emergente. Si midiésemos con precisión el brillo, discerniríamos corrimientos gravitatorios mucho menores que una longitud de onda.

La naturaleza corpuscular de la luz limita la precisión con que podemos medir el brillo. Los fotones (o partículas de luz) son emitidos rápidamente por el láser que ilumina el interferómetro. El error relativo en el recuento de fotones es igual al inverso de la raíz cuadrada del número detectado durante la medición; un haz láser más potente rebajaría, pues, el error. El salto mínimo de un milisegundo mensurable mediante un interferómetro sencillo e iluminado por un láser de un watt es de 10^{-14} metros. Los interferómetros pueden medir corrimientos mucho menores que las dimensiones de un átomo, incluso que las del núcleo de un átomo, porque los haces luminosos se reflejan en billones de átomos de la superficie del espejo.

La posibilidad de alargar la longitud de un interferómetro resulta decisiva para aumentar su sensibilidad. La longitud de los actuales prototipos de interferómetro varía desde 1,5 metros (el del M.I.T.) hasta 40 metros (el del Caltech). Las masas de prueba de los interferómetros proyectados para el LIGO se hallarán a cuatro kilómetros de distancia, 100 veces mayores que en el prototipo experimental del Caltech.

La sensibilidad de todos los detectores en funcionamiento o en proyecto se incrementa reflejando la luz, hacia adelante y hacia atrás, muchas veces, entre los espejos del interferómetro. El aumento de sensibilidad crece linealmente con el número de reflexiones, a menos que la luz pase tanto tiempo en los brazos del interferómetro que los efectos de las ondas gravitatorias se promedien. Se pueden usar dos métodos para "doblar" el rayo luminoso [*véase la figura 6*]: una línea de demora óptica (sugerida por Weiss) y una cavidad de Fabry-Pérot (sugerida por Drever). En una línea de demora óptica, la luz atraviesa un pequeño orificio en un espejo adyacente al divisor de

haces y se refleja repetidamente antes de volver a emerger por el orificio de entrada. En la cavidad de Fabry-Pérot, la luz atraviesa un espejo parcialmente transmisor y se acumula en una cavidad resonante, coronada por un espejo totalmente reflector. La luz emerge luego a través del espejo de entrada.

Para buscar señales próximas a una frecuencia específica, podemos igualar el tiempo de demora de la luz a la mitad del periodo de las ondas gravitatorias. La sensibilidad crece entonces intercambiando la luz entre los dos brazos a la frecuencia de búsqueda. Mejoraremos también la sensibilidad reciclando la luz que emerge del interferómetro; obligándola a realimentar al instrumento, se eleva la potencia del láser utilizado.

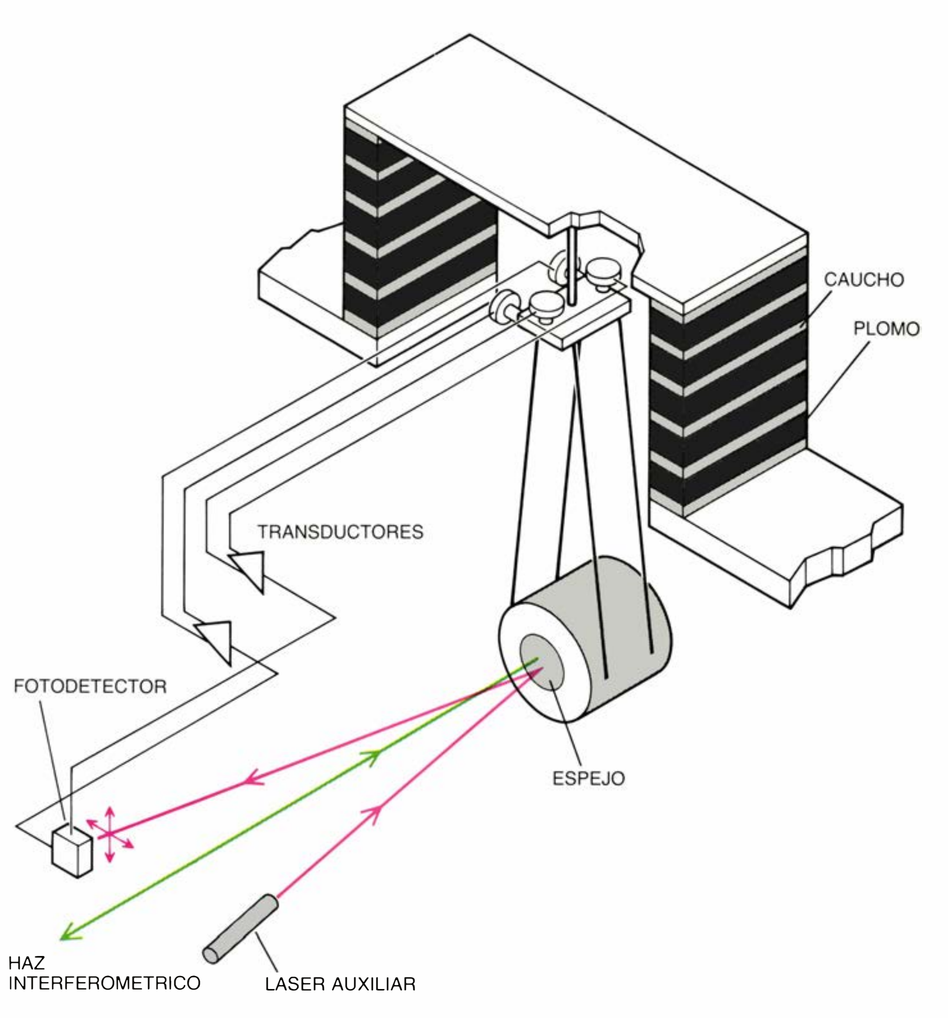
El efecto de la radiación gravitatoria es universal: todas las masas acusan las ondas gravitatorias. Las masas de prueba que forman la parte central de los interferómetros de ondas gravitatorias resultan excepcionales en tres aspectos. Son libres para responder al paso de una onda; forman parte de un instrumento suficientemente sensible para medir los pequeñísimos corrimientos inducidos por tal onda, y están aisladas de fuerzas que podrían enmascarar la señal.

El amplio muestrario de ruido indeseado que amenaza con enmascarar la respuesta de las masas a la radiación gravitatoria incluye perturbaciones sísmicas, vibraciones térmicamente excitadas de las masas y efectos de moléculas residuales de gas que incidan sobre las masas y penetren en los haces láser. Las vibraciones de fondo asaltan los observatorios terrestres de ondas gravitatorias con un ruido de corrimientos que son muchas veces mayores que las señales esperadas. Los grandes movimientos del suelo, tales como los ocasionados por terremotos o por la actividad humana y mecánica en las proximidades, son infrecuentes e identificable su origen terrestre. Más molesto es el constante e inevitable ruido producido por la actividad sísmica de pequeña amplitud, impulsada por el viento y las olas y por los movimientos internos de la Tierra.

La intensidad del ruido sísmico de fondo decrece rápidamente con frecuencias superiores a 10 hertz, pero incluso a varios centenares de hertz excede con mucho la sensibilidad requerida del detector. Para aislar los observatorios de ondas gravitatorias de tales efectos indeseados, las masas de prueba se suspenden, cual masas de un péndulo, de finos alambres. Los movimientos rápidos del punto de suspensión se atenúan en seguida antes de alcanzar la masa que está abajo. Los puntos de suspensión, a su vez, se aíslan mediante una estructura elástica de soporte, que actúa como los amortiguadores de un automóvil, para suavizar los baches de la actividad sísmica. Esta combinación de muelles y alambres ha mostrado ser muy adecuada para bloquear el ruido sísmico cuya frecuencia no baje de los 500 hertz; para buscar ondas gravitatorias de frecuencias inferiores, quizás haya que emplear sistemas de suspensión más elaborados y basados en bucles de realimentación.

Otra fuente de ruido es la vibración térmicamente excitada de las masas de prueba. Las masas vibran sin cesar, alimentadas por su propia energía interna. Se reduce el efecto de interferencia de la vibración térmica creando masas compactas y de estructura sencilla, para que resuenen a frecuencias muy por encima de la banda de las ondas gravitatorias esperadas. La región del codo de la mayor parte de los interferómetros (allí donde se cortan los tubos de vacío) contiene el grueso de la compleja óptica; si ésta se hallara concentrada en una masa, daría por resultado una estructura con muchas resonancias superpuestas. En la práctica, la masa central suele estar dividida en componentes suspendidas por separado, dotada cada una de un conjunto de resonancias tolerable.

El efecto de las moléculas residuales de gas que incide sobre las masas y penetra en los haces de láser se minimiza mediante el vacío de los tubos. Como

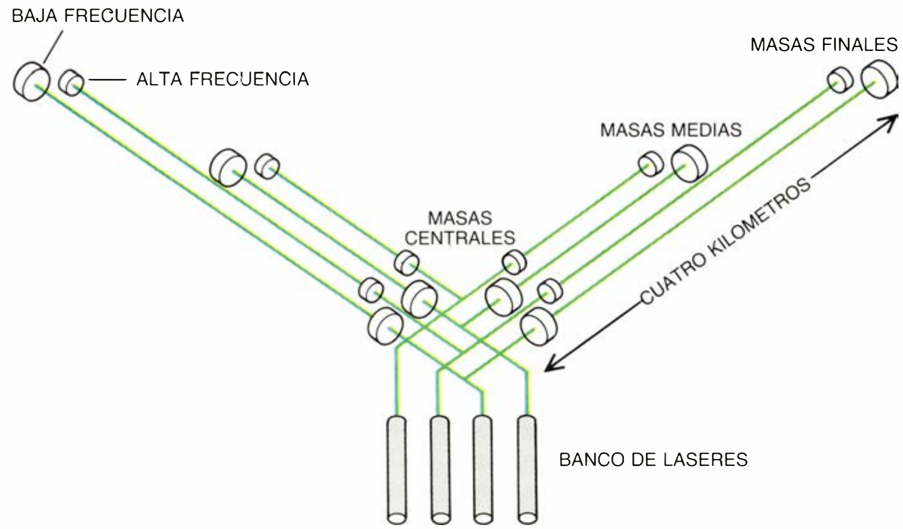


7. MASA DE PRUEBA en un detector interferométrico de ondas gravitatorias. La muestra debe quedar aislada de fuerzas externas perturbadoras, como las que tienen un origen sísmico. Para lograrlo, se suspende de alambres muy finos cada masa, que puede ser al propio tiempo el espejo del interferómetro. Se aumenta el aislamiento fijando los otros extremos de los alambres a una estructura de capas alternas de plomo y caucho. Para mantener la orientación angular del espejo, se refleja un haz láser auxiliar en la superficie del espejo, desde donde se encamina hacia un fotodetector sensor de la posición. El fotodetector envía señales a un transductor electromagnético que inclina y hace girar una masa menor cerca del punto de suspensión. La masa pequeña se comporta como si se tratara del mango que gobierna las marionetas; sirve para corregir cualquier desviación angular que pudiera interferir con las mediciones. (Esquema de George Retseck.)

la velocidad de la luz fluctúa al atravesar el gas residual, se requiere un vacío casi perfecto.

Las variaciones locales de los campos magnético y gravitatorio y otros fenómenos parecidos producen perturbaciones menores. Pero no es probable que muchas fuentes de ruido, conocidas o desconocidas, afecten simultáneamente a detectores que distan miles de kilómetros entre sí, como es el caso del par de detectores del LIGO. La radiación gravitatoria de fuentes cósmicas baña uniformemente la Tierra y afectará de manera semejante, y casi a la vez, a los detectores situados en cualquier punto de la misma. Resultará difícil confundir con el ruido el sello de un impulso de radiación gravitatoria, registrado al mismo tiempo en dos o más detectores muy alejados.

Los actuales interferómetros, construidos a escala de laboratorio, carecen de la sensibilidad necesaria para detectar ondas gravitatorias de galaxias lejanas; las fuentes alojadas en la Vía Láctea que podrían detectarse no emiten con asiduidad: quizás una vez cada 30 años. Con sus brazos de cuatro kilómetros, el LIGO debe adquirir sensibilidad suficiente para registrar impulsos con amplitudes de corrimiento inferiores a 10^{-21}, nivel al que se esperan muchas señales astrofísicas. Además, casi todo el ruido que interfiere con la medida de los corrimientos de las masas de prueba, incluidos el ruido sísmico y la agitación térmica, es independiente de la longitud de los brazos, en contraste con la intensidad de la señal registrada, que aumenta con la lon-



8. MAGNO INTERFEROMETRO que se espera que entre en servicio el próximo decenio. Será el primero de un par de ellos que formarán el observatorio de ondas gravitatorias por interferometría de láser, o LIGO. Un interferómetro se construirá en la Baja California y el otro en Maine. Ambos instrumentos se hallarán electrónicamente conectados para operar como un único observatorio. La figura es una recreación artística de uno de los detectores. Cada instrumento tendrá brazos de cuatro kilómetros de largo. Una de las posibles disposiciones del LIGO constará de cuatro interferómetros, activados por sendos láseres independientes, aunque emplearán el mismo conjunto de tubos (*derecha*). Dicho funcionamiento de los interferómetros, uno junto a otro y optimizado cada uno para una señal astrofísica diferente, incrementará la versatilidad del LIGO. Cada sistema óptico se halla duplicado en una configuración de mitad de longitud, es decir, de dos kilómetros, para así rechazar las señales espurias.

gitud. De las fuentes de ruido que aumentarían con la longitud, tales como las fluctuaciones en la dirección de los láseres y las desviaciones y atenuaciones producidas por las moléculas de gas, la mayoría son pequeñas o fáciles de controlar.

Un solo detector de ondas gravitatorias goza de una capacidad limitada de deducir la dirección de procedencia. Eso significa que los interferómetros instalados en diferentes puntos de la Tierra pueden registrar simultáneamente señales de una gran parte del cielo. Aunque bastan dos detectores para distinguir del ruido de fondo los impulsos, serán precisos al menos tres para medir con exactitud de qué dirección provienen los impulsos de la señal. La información relativa a la dirección se obtendrá comparando los tiempos de llegada de los impulsos en los distintos detectores. Los dos proyectos europeos de construcción de grandes detectores presentan un calendario parecido al de los norteamericanos. Así, el detector con brazos de un kilómetro y previsiones para extenderlos hasta tres habrá de construirse en Escocia por la Universidad de Glasgow y el Laboratorio Rutherford-Appleton. El que proyectan construir en Baviera los Institutos Max Planck de Alemania Occidental tendrá brazos de tres kilómetros que se cortarán en ángulos de 60 grados; el observatorio puede crecer y acomodar tres interferómetros combinados en un triángulo equilátero. Un tercer grupo, francés, tiene previsto construir un gran interferómetro, si bien está emplazado para unas fechas muy posteriores.

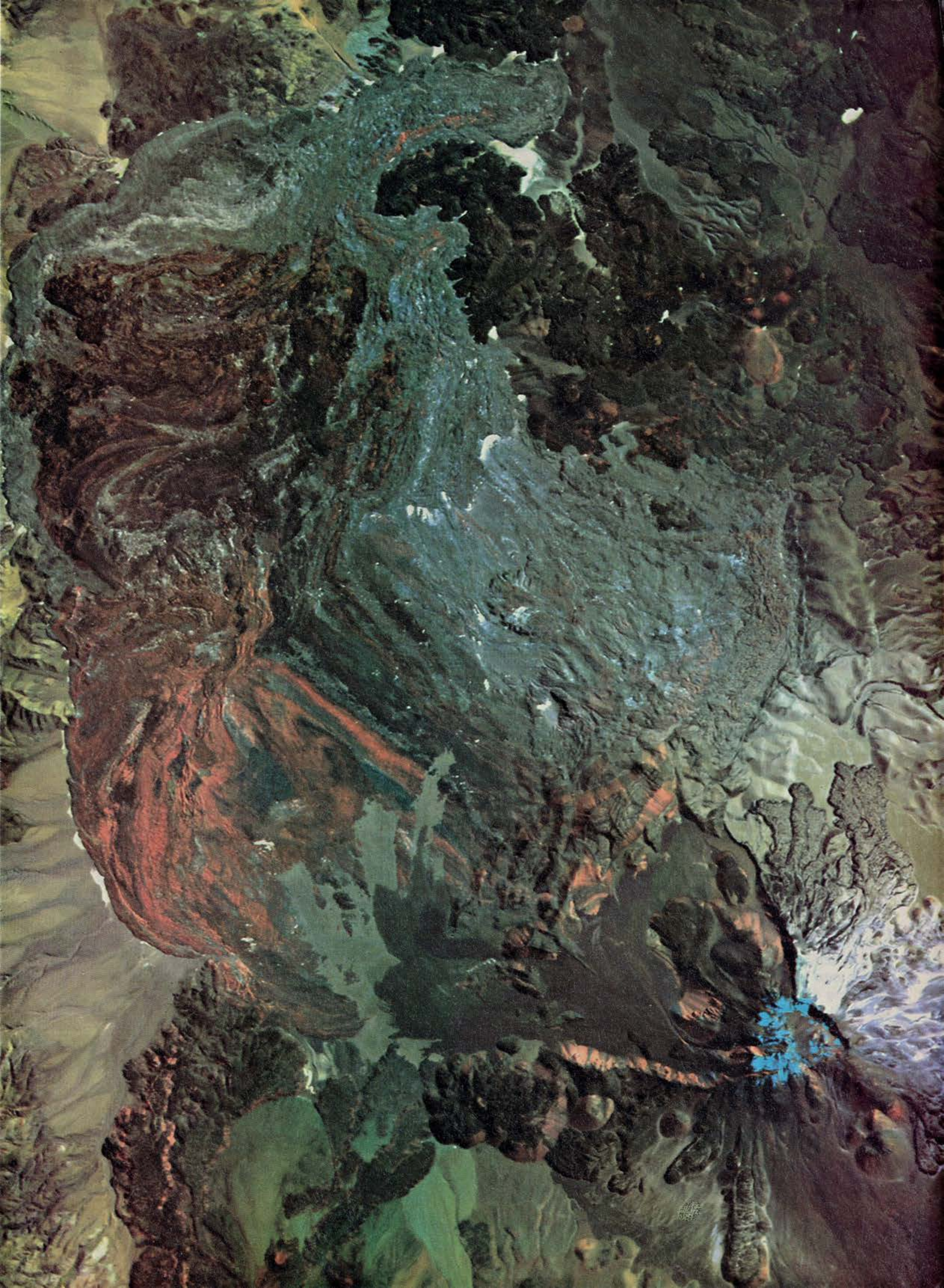
El LIGO tendrá tubos de vacío con capacidad suficiente (diámetros de 1,2 metros) para acomodar varios interferómetros, cada uno con masas de prueba suspendidas por separado. Los interferómetros que sólo usan la mitad de la longitud responderán, igual que los que funcionan en longitud total, a la mayoría de las influencias parásitas; ahora bien, responderán sólo en una mitad ante las señales legítimas. Gracias a ese dispositivo se distinguirá entre señales genuinas y perturbaciones espurias.

Buena parte del ruido que entorpece las mediciones proviene del entorno terrestre; problema que se evitaría instalando observatorios de ondas gravitatorias en el espacio. Se trata de una solución en la que se está trabajando afanosamente. En ese sentido se inscribe el experimento encaminado a medir la frecuencia de una señal de microondas que se haya enviado a la Tierra desde una sonda espacial lejana. Un pulso gravitatorio produciría un corrimiento en la frecuencia de la onda. El método resulta sensible para las ondas gravitatorias que se encuentran en el dominio de frecuencias de una por minuto a una por hora, gama que cae muy por debajo del dominio de frecuencias de cualquier antena terrestre. La sensibilidad alcanzada hasta ahora ha resultado insuficiente para detectar onda alguna.

Un experimento espacial más elaborado, en fase de estudio, emplearía láseres para medir la separación de masas de prueba situadas en órbita alrededor del Sol. La distancia entre las masas podría ser incluso de un millón de kilómetros. Tal sistema serviría para investigar las ondas gravitatorias procedentes de estrellas binarias clásicas, que giran lentamente una en torno de la otra. Aunque un interferómetro espacial mucho más corto sería útil en la banda del kilohertz, probablemente no funcionaría mejor que los detectores terrestres a esas frecuencias, con el agravante de su enorme coste.

Cada avance en la tecnología astronómica, y aquí incluimos los radiotelescopios y los telescopios de rayos X, infrarrojos y ópticos, ha aportado una nueva dimensión a nuestra interpretación del cosmos. El siglo XIX nos ofrecía un universo tranquilo, depositario de una eterna colección de estrellas. Hoy sabemos que el universo nació en una explosión titánica y se expande a enorme velocidad. Está lleno de universos insulares, que a su vez son sede de fenómenos violentísimos: chorros de gas que rugen a lo largo de miles de años-luz, viejas estrellas que sus vecinas están destruyendo y nuevas estrellas que se encienden en el seno de vastas nubes oscuras.

Esperemos que el LIGO y los otros observatorios de ondas gravitatorias proporcionen la primera visión clara de fenómenos que hasta ahora sólo podemos vislumbrar mediante la radiación electromagnética. Los observatorios podrían muy bien detectar el colapso de núcleos de supernovas, la soldadura relativista de estrellas de neutrones y, tal vez, la formación de agujeros negros. Y lo que es más importante: nuestro conocimiento del cosmos se enriquecerá, de nuevo, con el descubrimiento de fenómenos que sólo la radiación gravitatoria permite contemplar.



Hundimiento de los volcanes

En el ciclo de vida de muchos volcanes, el hundimiento catastrófico constituye un acontecimiento "normal". La historia del proceso se refleja en los depósitos dejados por avalanchas de derrubios

Peter Francis y Stephen Self

Los volcanes son montañas insólitas. La mayoría de las cumbres montañosas están intensamente moldeadas por la erosión, esculpidas por el agua y el hielo en grandes bloques de corteza que la tectónica ha aupado. No ocurre eso con los volcanes, que constituyen formas destructivas: se autoconstruyen a partir de lava y cenizas. Al poder elevar su propia altura, cabe preguntarse por qué los volcanes no son, en justa consecuencia, las montañas más altas de la Tierra (como lo son en Marte y probablemente en Venus). ¿Qué factores limitan la altura de un volcán terrestre?

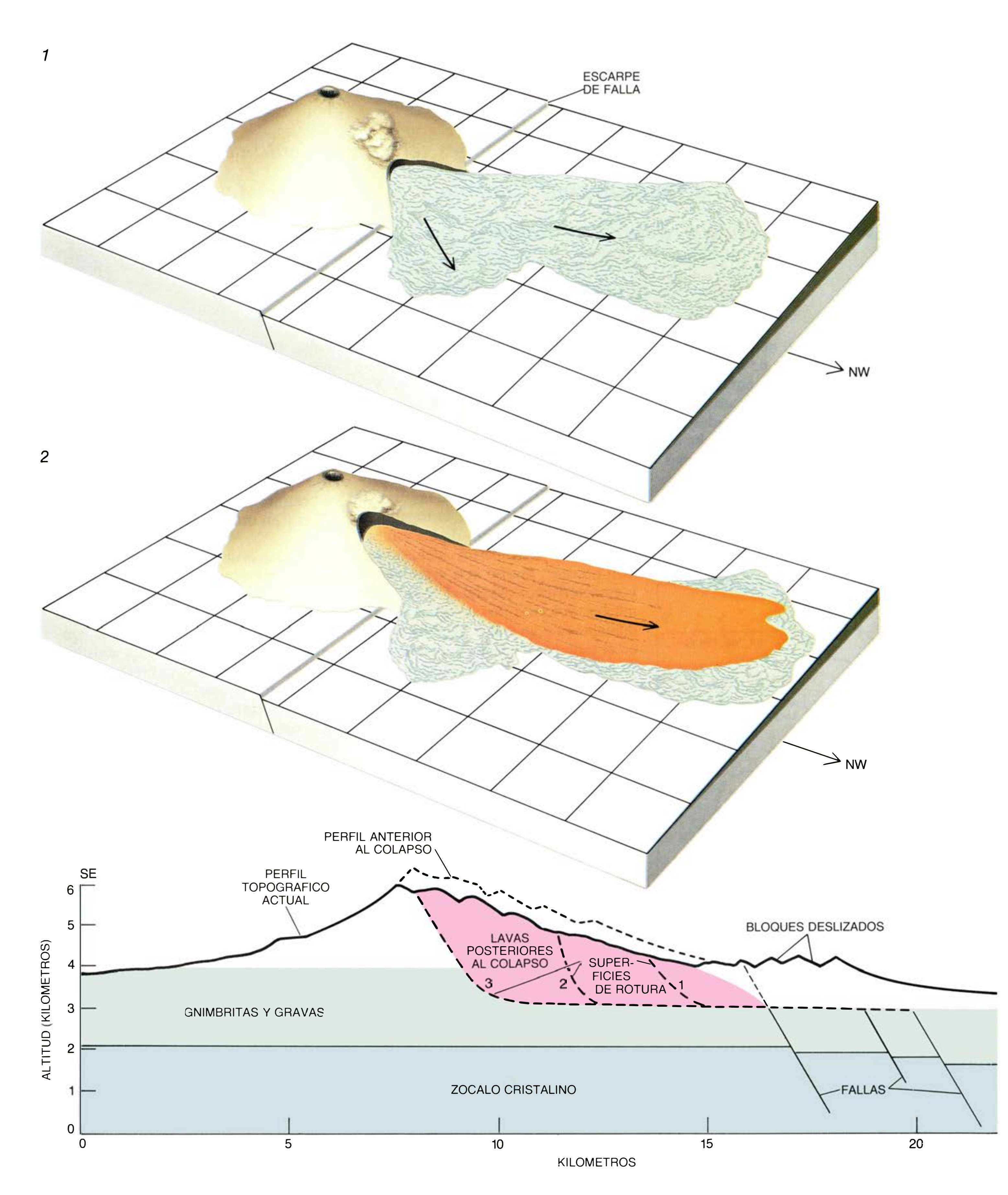
Obvio es afirmarlo, los volcanes se hallan también sujetos a la erosión, amén de procesos tales como la depresión de la corteza bajo pesadas cargas, que protienden a allanar la topografía de la tierra. A lo largo de los últimos años, se ha descubierto, además, que otro proceso, mucho más espectacular y característico, acorta el tamaño de muchos volcanes: los colapsos o hundimientos a gran escala. A pesar de que en el siglo pasado se habían observado ya colapsos de conos volcánicos en diversas ocasiones, fue la erupción violenta del monte Santa Helena, en mayo de 1980, la que atrajo la atención hacia la posibilidad de que la ladera entera de un volcán pudiera ceder repentinamente, desencadenando, además de una erupción explosiva, una devastadora avalancha de derrubios. En su empeño por conocer los fenómenos de colapso, varios investigadores han acometido el estudio de los depósitos que dejaron las avalanchas de derrubios en el monte Santa Helena y otros volcanes. Se han identificado un centenar largo de depósitos de ese tipo; su edad oscila desde algunos años hasta miles de ellos y, su tamaño, desde menos de un kilómetro cúbico hasta más de veinte.

En el curso de nuestra investigación, comenzamos por examinar las imágenes obtenidas por el Landsat para así contar desde un principio con la identificación de los depósitos desconocidos de avalanchas en volcanes de los Andes centrales. Emprendimos un minucioso estudio de campo del depósito andino por excelencia: el del volcán Socompa en Chile. Gracias a los resultados de nuestro trabajo y de otros investigadores, en particular los obtenidos por Tadahide Ui, de la Universidad de Kobe, está ganando cuerpo la idea según la cual los hundimientos generales y esporádicos de los conos inestables constituirían episodios normales del ciclo vital de un volcán. Esta conclusión resulta válida, de manera señalada, para los grandes volcanes o estratovolcanes, cientos de los cuales se hallan en el "cinturón de fuego" que ciñe el Pacífico y en otras partes del mundo.

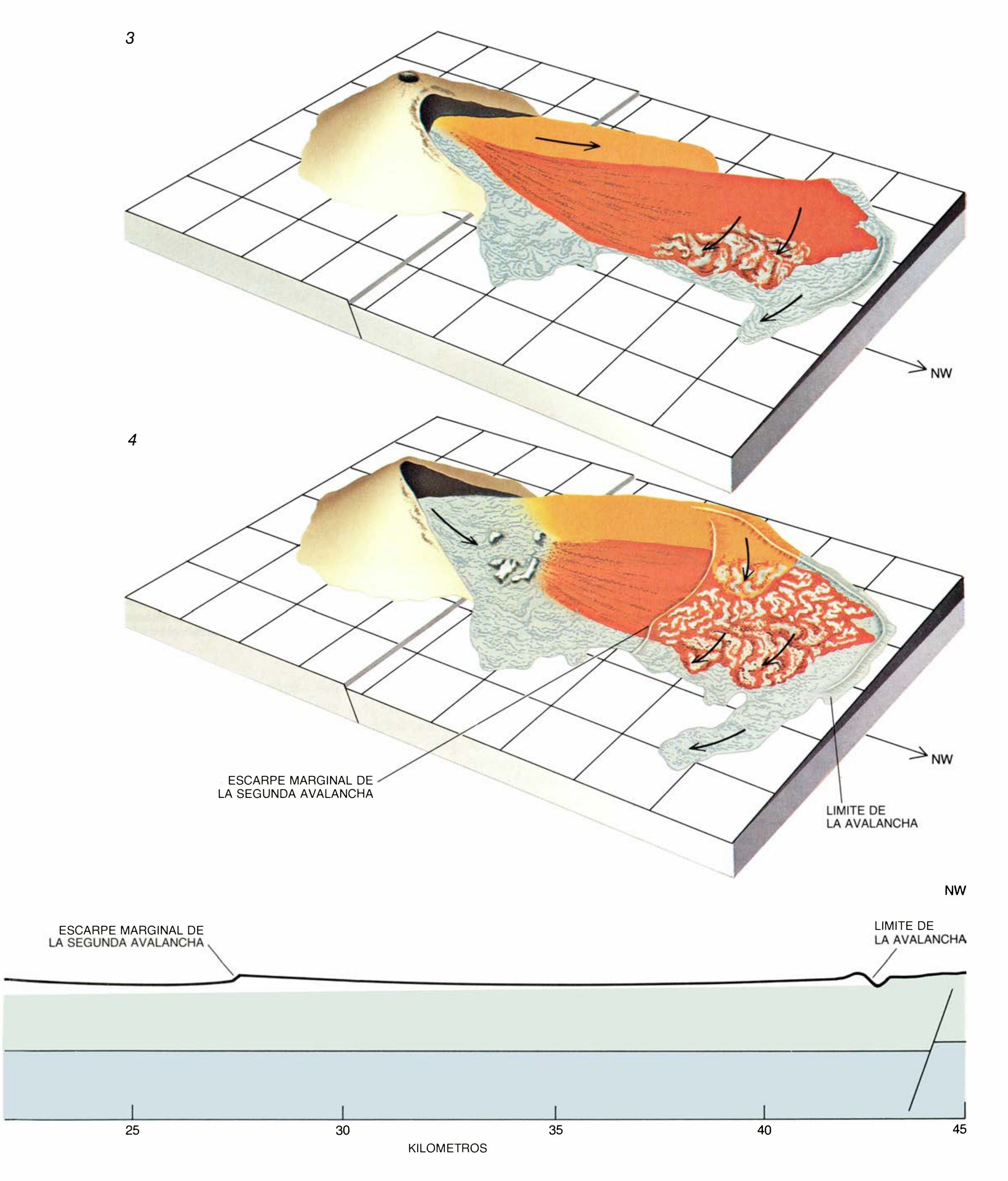
1. VOLCAN DE SOCOMPA, sito en Chile septentrional, representado en el mapa temático del Landsat. Colapsó en una avalancha de proporciones gigantescas hace unos 7500 años. La imagen en falso color es una composición de datos recogidos en diversas longitudes de onda. El depósito de avalancha permite apreciar, en virtud de sus características espectrales, las diferentes corrientes de derrubios, que cubren unos 600 kilómetros cuadrados. Las áreas grises del norte y este son gravas e ignimbritas del zócalo subvolcánico; en las zonas rojizas, las lavas procedentes del propio volcán subyacen a los materiales del zócalo. Las azules señalan las nieves en la cumbre del Socompa, a 6051 metros de altura.

Una razón de la especial sensibilidad de los estratovolcanes ante los colapsos la hallamos en su propia constitución. Suelen ir asociados a zonas de subducción: franjas en las cuales convergen dos de las placas que constituyen la capa externa de la tierra y donde una de ellas se hunde por debajo de la otra. (El "cinturón de fuego" es, de hecho, una zona de subducción.) Un volcán en zona de subducción tiende a emitir lavas dacíticas o andesíticas, bastante ricas en sílice y, por tanto, relativamente viscosas. En lugar de fluir lejos del volcán, estas lavas se acumulan alrededor de la chimenea creando un cono de laderas muy inclinadas, que, con el tiempo, pueden convertirse en mecánicamente inestables.

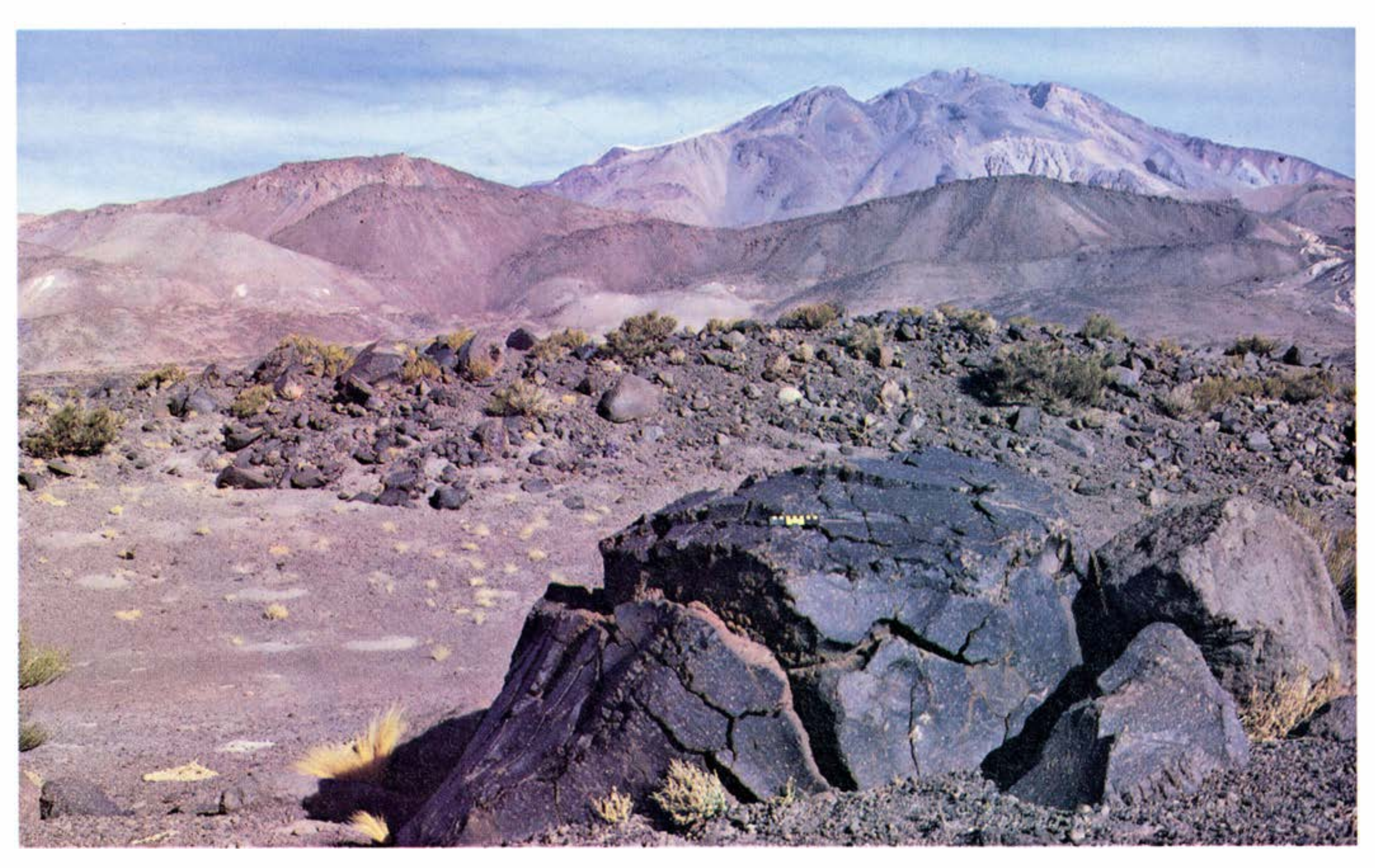
En los estratovolcanes se pueden distinguir tres tipos de colapso. El primer tipo está representado por el monte Santa Helena, cuyo hundimiento produjo una violenta explosión. En el interior de dicho monte había hecho intrusión una masa de magma, o roca fundida. La inyección del magma originó una protuberancia prominente, que desestabilizó el flanco norte de la montaña; el vapor de agua a muy alta temperatura, formado por la interacción entre el magma y el agua subterránea, permaneció atrapado y sometido a altísima presión en el seno del volcán. Cuando un terremoto precipitó el hundimiento parcial del cono, el vapor escapó entre explosiones esparciendo cenizas y derrubios por los contornos.



2. COLAPSO DEL SOCOMPA y los cuatro estadios de su desarrollo. El episodio no duraría más de diez minutos. Antes de su hundimiento, el volcán se había desestabilizado por la intrusión de magma fundido, que formaría domos en la vertiente oeste. El colapso lo desencadenó un terremoto que afectó al escarpe de falla localizado bajo el flanco oeste (*1*). La primera superficie de rotura estaba en la base de la montaña (*sección transversal*); el primer impulso de la avalancha (*gris*) sería, pues, de gravas e ignimbritas arrancadas del zócalo subvolcánico. Este material avanzó hacia el noroeste, en dirección perpendicular a la pendiente regional, a una velocidad de 300 kilómetros por hora. Antes de llegar al punto noroeste más alejado, a 35 kilómetros de la cima del Socompa,



lo alcanzó una nueva oleada de material (*rojo*), propulsada por el derrumbamiento del propio volcán (*2*). Este segundo flujo abundaba en lavas recientes. Ambas avalanchas se detuvieron brevemente; gran parte del material empezó entonces a deslizarse por la suave pendiente regional (tres grados) hacia el noreste (*3*). Al mismo tiempo, otro derrumbamiento en lo alto del volcán desencadenó una tercera avalancha en masa (*naranja*) hacia el sudoeste de las dos primeras. Partes de las tres avalanchas continuaron avanzando, sobrepasando y mezclándose con la primera avalancha y dejando un empinado escarpe marginal (*4*). Se desprendieron grandes bloques de las paredes del circo abierto por el colapso. Los bloques recorrieron varios kilómetros antes de detenerse.



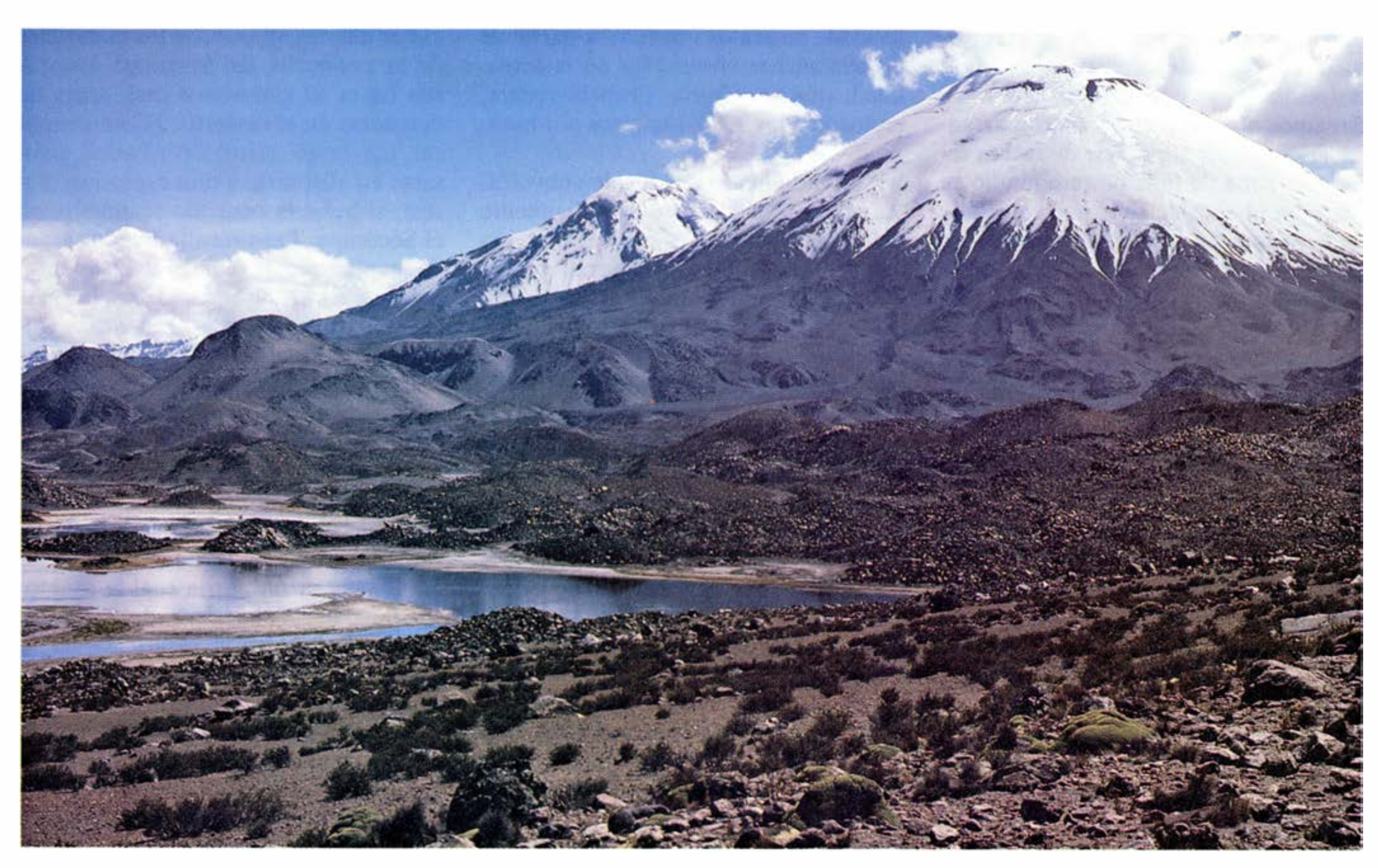
3. BLOQUES EN "CORTEZA DE PAN" de lava dacítica, pertenecientes al depósito de avalancha del Socompa; demuestran que el magma se intruyó en el volcán antes del colapso. El exterior vidrioso e interior esponjoso del bloque que aparece en primer plano indican que se enfrió rápidamente a partir del estado fundido durante el curso de la avalancha. Las colinas que se distinguen en segundo término son bloques deslizados, de varios cientos de metros de altura y dos kilómetros de longitud, que descendían del volcán de Socompa durante el estadio final del colapso. La cumbre del Socompa se encuentra a 16 kilómetros.

El segundo tipo de colapso encuentra su ejemplo arquetípico en el volcán Bandai-san, en Japón. Aunque su derrumbamiento en 1888 lo provocó también otro terremoto, acompañado por explosiones, no existe prueba alguna de que se intruyera nuevo magma en el interior del volcán. Las explosiones resultaron, probablemente, de la interacción entre el agua subterránea y el calor, pero no entre aquélla y una gran masa de roca fundida. Quedan, por último, los hundimientos no relacionados con procesos explosivos ni con actividad volcánica; simplemente el volcán colapsa en una avalancha "fría" semejante a las que suelen ofrecernos las montañas no volcánicas. El ejemplo más reciente de este proceso tuvo lugar en el volcán japonés de Ontake, en 1984.

El monte Santa Helena constituye el único caso de volcán sujeto a estricta vigilancia mientras estuvo en fase de colapso. ¿De qué forma podemos reconocer el tipo de hundimiento que aconteció en tiempos prehistóricos? En los contados ejemplos en que la avalancha de derrubios constituyó el último episodio violento de la historia del volcán, la prueba es, indudablemente, el vasto circo en herradura dejado por la avalancha, que permanece visible durante miles de años. En un volcán activo, las efusiones de lava podrían restañar la cicatriz en poco tiempo. En el monte Santa Helena, la avalancha arrancó unos 2,8 kilómetros cúbicos de roca de la ladera, creando un circo gigantesco de dos kilómetros de ancho por 600 metros de profundidad; a pesar de ello, una tercera parte de su superficie está ya ocupada por un domo de lava aflorante. En los volcanes Tata Sabaya, de Bolivia, y Parinacota, de Chile, que sufrieron hundimientos generales hace miles de años, los circos han quedado enteramente tapados por efusiones de lava y domos.

En tales casos, las señales del hundimiento yacen en los depósitos dejados en la vertiente por las avalanchas de derrubios volcánicos. No siempre resulta fácil identificar esos depósitos: pueden hallarse camuflados por suelos más recientes o por vegetación, o incluso confundirse tras procesos comunes de erosión y sedimentación. Debe destacarse, sin embargo, que los depósitos de avalancha muestran frecuentemente su estructura característica. Su rasgo distintivo es un relieve de pequeñas irregularidades ("hummocky"): miles de pequeñas colinas y depresiones cubren decenas o centenas de kilómetros cuadrados en la base del volcán. La topografía irregular ("hummocky") nos ha servido de punto de referencia para descubrir los hundimientos volcánicos de los Andes centrales en las fotografías obtenidas por satélite.

El ejemplo más espectacular que hemos hallado es el de Socompa: un volcán del norte de Chile, en la frontera con Argentina, cuyo hundimiento ocurrió hace unos 7500 años. Si el circo del monte Santa Helena ocupa un arco de 30 grados en el perímetro del volcán, la avalancha del Socompa abrió una cuña de 70 grados y el volumen de material deslizado por la ladera de la montaña multiplicó por diez el del caso norteamericano. Su depósito de avalancha es uno de los mayores del mundo, pues cubre una superficie de 600 kilómetros cuadrados. Excepcionalmente, el depósito se ha conservado en magníficas condiciones, convirtiendo a Socompa en un modelo para el estudio de los hundimientos volcánicos.



4. PARINACOTA, otro volcán ubicado en Chile septentrional. Se hundió hace de 15.000 a 17.000 años. La fotografía, tomada como la anterior por Stephen Self, muestra dos rasgos característicos de los depósitos de avalanchas volcánicas: a la izquierda, al pie del volcán, aparecen grandes bloques deslizados; ante ellos, un relieve característico de pequeñas colinas (''hummocks''). La depresión entre las colinas está rellenada por un lago. A juzgar por la extensión de los depósitos (150 kilómetros cuadrados), el colapso del Parinacota fue menos espectacular que el del Socompa. La efusión de lava tapó el circo.

El Socompa mide hoy 6051 metros de altura; antes del colapso alcanzaba, probablemente, los 6300 metros. La montaña es mucho más alta en su vertiente oeste, alzándose unos 3000 metros sobre el desierto de Atacama, que en la oriental, donde presenta un desnivel de unos 2000 metros. La diferencia de altitud entre los niveles de base este y oeste constituye un dato importante para descubrir la causa de los hundimientos. El terreno al este del Socompa se yergue más alto, porque lo han aupado grandes fallas, muy extensas, orientadas de norte a sur y situadas en la base del flanco oeste de la montaña, donde empezó cabalmente el hundimiento. Obviamente, donde hay fallas, suelen producirse terremotos. Parece muy probable que un intenso terremoto a lo largo de una de estas fallas desencadenara el colapso del Socompa; un terremoto fue lo que ocasionó el colapso del monte Santa Helena. Todavía se distinguen vestigios de las fallas; éstas cortan depósitos de gravas recientes, lo que sugiere la posibilidad de que persistirían en su actividad 7500 años después del cataclismo.

Por esa misma razón, el Socompa debió verse sacudido por centenares de terremotos a lo largo de los miles de años que precedieron a su desplome. ¿Por qué, entonces, no colapsó antes? Una vez más, la respuesta parece coincidir con la ofrecida por el ejemplo del Santa Helena. Los datos de campo muestran que se intruyó magma nuevo en el Socompa durante el colapso, vomitándose luego en forma de lava por la parte alta del cono. Los depósitos de avalancha albergan numerosos bloques en ''corteza de pan'', así llamados por su exterior vidrioso y su estructura interna esponjosa que les confieren el aspecto de un pan bien horneado. Algunos de estos bloques miden más de 20 metros de diámetro. Sólo podían proceder de una masa de magma reciente, que al intruir en el volcán tendió a desestabilizarlo.

En nuestra opinión, fue esa letal coincidencia entre un terremoto y un período de actividad magmática la que dio lugar al colapso del Socompa. No sabemos a ciencia cierta si el colapso produjo una explosión o no. En el monte Santa Helena, el depósito característico de cenizas y derrubios resultante de la gran explosión es extremadamente delgado (del orden de varios centímetros a casi un metro de potencia); no tardará muchas décadas en allanarse por erosión. A nadie debe extrañar, pues, que no existan pruebas inequívocas de la explosión del Socompa. En general, las tensiones alcanzan tal magnitud que la avalancha volcánica acabará por generar una erupción explosiva en presencia de magma recién intruido. La evacuación del volcán conduce a una repentina relajación de las presiones en el interior ardiente, y esa es la receta segura para una explosión.

La avalancha del Socompa originó un enorme socavón en la montaña. Mientras la mayor parte de los derrubios del monte Santa Helena procedían de la misma estructura del volcán, una fracción considerable del deslizamiento del Socompa (más de la mitad seguramente) no pertenecía al propio volcán, sino al zócalo subyacente. Este zócalo, que se extiende en profundidad desde un nivel de unos 4000 metros, está constituido por rocas volcánicas de una era geológica completamente distinta e incluso por rocas de origen no volcánico. Así, pues, en el depósito de avalancha del volcán Socompa hallaremos, con los bloques de lava normales, una

gran cantidad de ignimbritas (rocas formadas a partir de cenizas de antiguas erupciones) y gravas sedimentarias. Creemos que estas rocas fueron arrancadas cuando la superficie de rotura rebanó la zona de falla oeste e hindió su corte en el zócalo. El primer episodio de la avalancha surgió inicialmente en el zócalo antes que en la cima de la montaña.

La dinámica de la avalancha siguió un curso extraordinario. Cuando el primer impulso alcanzó el pie del Socompa, avanzando en dirección noroeste, no descendió por la pendiente regional hacia el noreste. Antes bien, continuó por su camino, perpendicular a la pendiente regional, hasta encontrar un terreno empinado a 35 kilómetros del cono del volcán. (El límite noroeste de la avalancha está definido en la parte frontal del flujo por un escarpe de más de 40 metros del altura.) El hecho de que la avalancha no siguiera una trayectoria curva –como haría una bola si rodara suavemente por un plano inclinado– sugiere que se movía a gran velocidad. Sin disponer del medio directo para determinar la velocidad, podemos afirmar, a partir de las avalanchas observadas en la actualidad, que se cifraría, probablemente, en torno a los 300 kilómetros por hora.

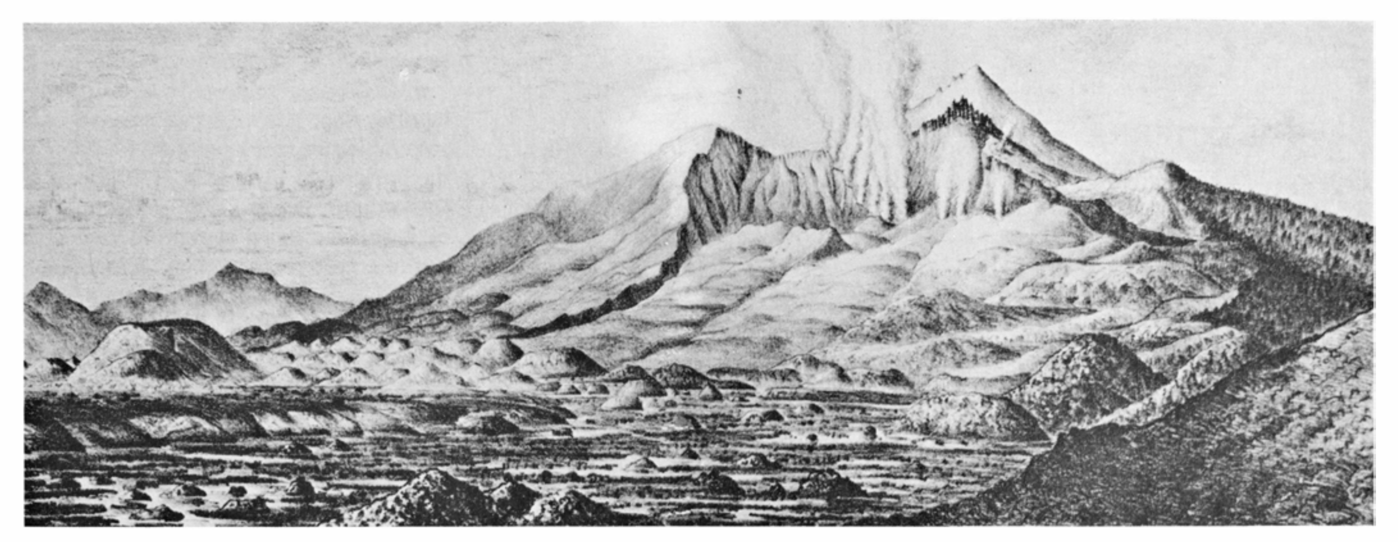
El hundimiento del zócalo subvolcánico provocó el derrumbamiento del propio volcán, lo que dio origen a un segundo flujo de material procedente de lo alto de la montaña que no tardó en superar al primero, y siguió desplazándose hacia el noroeste. Ambas avalanchas en masa sólo se detuvieron brevemente. Entonces, todo el material, que se extendía hasta más de 25 kilómetros del volcán, salvo en una estrecha franja en el margen noroeste, se deslizó y formó un ángulo recto con respecto a su curso inicial, bajando por la pendiente regional hacia el noroeste. El segundo flujo sobrepasó a la primera avalancha de materiales; debido a ello, esta cara de la montaña está marcada por un prominente precipicio, o escarpe, en dirección noreste. Más tarde, una nueva avalancha que arrancó de la parte alta del volcán sobrepasó determinadas partes de las anteriores.

Por último, algunos de los materiales de la avalancha del Socompa avanzaron hasta 40 kilómetros casi, antes de detenerse en el desierto. ¿Cómo explicar tan largo recorrido? Podría pensarse en atribuirlo a una explosión masiva, si hubiera ocurrido realmente en el Socompa. Pero resulta que las grandes explosiones no contribuyen apenas, si es que contribuyen en algo, a la energía desarrollada por las avalanchas volcánicas. En ese punto, las avalanchas volcánicas se parecen a otras más corrientes: su energía procede principalmente de la gravedad. En otros términos, las avalanchas que se inician a mayor altura tienen más posibilidades de llegar más lejos. En el Socompa, la escarpada pendiente oeste ayuda a comprender la razón por la cual la avalancha fluyó hacia el desierto de Atacama.

Pero la pendiente escarpada no lo explica todo. La avalancha del Socompa avanzó mucho más lejos de lo que cabría esperar de acuerdo con la topografía de la región. Gran parte del material de la avalancha procedía del zócalo subvolcánico, lo que significa que se inició a 4000 metros de altitud,



5. CIRCO DEL MONTE SANTA HELENA: tiene una profundidad de 600 metros y un diámetro de dos kilómetros. La fotografía se tomó en septiembre de 1984 por Lyn Topinka, del Servicio Geológico de los Estados Unidos. El domo de lava desarrollado en el circo recubre actualmente la tercera parte del suelo.



6. VOLCAN BANDAI-SAN, en Japón. Se hundió el 15 de junio de 1888. Esta litografía contemporánea, basada en fotografías y apuntes realizados tres semanas después del colapso, muestran con notable fidelidad el circo relleno de derrubios (con cráteres humeantes de vapor) y la topografía irregular (en colinas o "hummocks") del depósito de avalancha. A diferencia del volcán Santa Helena, al Bandai-san no lo desestabilizó la intrusión de magma nuevo.

o menos. El margen noroeste del depósito se extiende hasta 30 kilómetros desde la base de la montaña, a una altitud de 3200 metros. Dividiendo la caída vertical entre la distancia horizontal alcanzada, se obtiene una relación inferior a 0,03. (Este cálculo aplicado a la segunda avalancha procedente del noroeste apunta un resultado similar.) La relación entre distancias verticales y horizontales constituye un buen indicador de la movilidad de la avalancha; un valor típico podría ser de 0,1. La avalancha del Socompa parece haber sido de una movilidad inusual.

Según la explicación más plausible, el terremoto que provocó el colapso del volcán fue también el que instó la avalancha. En un terremoto intenso (de magnitud 7 u 8 en la escala de Richter) se suceden fuertes sacudidas del terreno durante varios minutos; asimismo, los temblores pueden aumentar en intensidad y prolongación cuando las ondas sísmicas van y vienen forzadas por la configuración cóncava de las rocas subsuperficiales, que es el rasgo geológico que hallamos en el Socompa. La avalancha del Socompa habría necesitado unos pocos minutos para llegar hasta los puntos más alejados. La energía sísmica añadida la habría mantenido en movimiento, ayudándole a compensar la pérdida de energía por rozamiento. Concretamente, el terremoto habría desplazado las masas de la primera avalancha una vez se hubieran éstas detenido brevemente, e iniciado la segunda avalancha de derrubios por la suave pendiente regional.

Los acontecimientos que hemos presentado –una avalancha espectacular, intensificada por violentos temblores que le acompañaron en su descenso por la vertiente a una velocidad impresionante– podrían sugerir que el flujo de derrubios resultante del colapso del volcán constituye un fenómeno turbulento de extraordinaria desorganización. No hay tal. Se trata, efectivamente, de un flujo complejo, en particular cuando alcanza su máxima velocidad, pero no es caótico ni turbulento. La característica de un flujo turbulento, según puede observarse en fluidos de baja densidad como el aire o el agua, es el constante movimiento relativo entre las partículas que componen el flujo de la masa. El flujo de una avalancha volcánica tiende, por contra, a convertirse en laminar, es decir, formado por capas uniformes que conservan su posición relativa. Sólo la capa inferior, la que está en contacto con el suelo, está sometida a un intenso esfuerzo de cizalla.

El movimiento de la avalancha en la primera parte de su avance, en la pendiente del volcán, se acomoda mejor a una descripción en términos de deslizamiento que de flujo. Bloques enormes de rocas, arrancados de la montaña, se precipitan por la pendiente. Aunque existan rotaciones retrógradas y mutuas presiones, los bloques permanecen intactos. Durante esta fase, si alguien tuviera valor, podría cabalgar a lomos de un bloque deslizante. En el Socompa, alguno de estos bloques –los arrancados en la cima y cerca del límite de la avalancha– persisten en la boca del circo, a varios kilómetros de su origen. El mayor de estos bloques viene a medir unos dos kilómetros de longitud por medio kilómetro de altura.

Con la avalancha se despegaron del volcán grandes bloques, pero los primeros no se quedaron en la boca del circo y se fragmentaron. Para cuando un bloque alcanza la base del volcán, su velocidad es de 100 a 200 kilómetros por hora. A esa velocidad, basta el esfuerzo de cizalla para desmenuzar los bloques en pequeños fragmentos, la mayoría de ellos menores de un metro de diámetro. El movimiento de estas rocas se acerca al de un flujo más que al mero deslizamiento. Pero no se trata de ningún flujo turbulento; los depósitos conservan delicadas relaciones estratigráficas tal y como existían en el volcán.

Esta observación se ha realizado en diversos depósitos de avalanchas, sin exceptuar la avalancha excepcional del Socompa. En el volcán original, la lava dacítica de color claro yace sobre la andesita, oscura; en los depósitos de avalancha, los restos de dacita pueden hallarse sobre los fragmentados restos de andesita. Por debajo de ambas, y más visibles en las partes lejanas del depósito, aparecen las gravas de tonalidad clara y las ignimbritas del zócalo subvolcánico. Las tres capas han sufrido una intensa cizalladura, de manera que, si originariamente tenían decenas o centenares de metros de potencia, se han reducido en los depósitos de avalancha hasta convertirse en delgadas láminas de escasos metros de grosor.

Nada puede sobrevivir en el trayecto de una avalancha volcánica que avance a gran velocidad y, debido a su enorme impulso, capaz de remontar centenares de metros cuesta arriba. Además, la destrucción puede exten-

derse más allá de las zonas arrasadas por la propia avalancha. Al romper la red de drenaje regional y al desbordar lagos y ríos, la avalancha puede generar corrientes caudalosas de fango. Todavía peor, si el volcán se halla en la orilla de un océano o de un gran lago, el desplazamiento repentino del agua por la acción de la avalancha puede desencadenar un tsunami devastador u olas de marea. El colapso del cono de Rakata en Krakatau en 1883 constituye un ejemplo de infeliz memoria. Cuando los derrubios procedentes del cono se sumergieron en el mar, originaron la "ola gigantesca" que asoló cientos de kilómetros de la costa del estrecho de Sunda (entre Java y Sumatra), barriendo ciudades enteras y causando la muerte a 30.000 personas.

La mayoría de los hundimientos volcánicos vienen precedidos, probablemente, por actividad magmática y se acompañan de explosiones eruptivas. En tales casos, la morfología del volcán aportaría bastantes indicios de un posible cataclismo. Por ejemplo, antes de la erupción del Santa Helena, los vulcanólogos que estaban controlando la evolución del cráter en su flanco noreste tuvieron conocimiento de que la montaña podía derrumbarse (aunque hoy nos es lícito admitir que se subestimó la magnitud del colapso). Cuando un volcán presenta la posibilidad de derrumbarse, es factible preparar mapas de riesgos y señalar qué zonas serán las previsiblemente afectadas por la explosión o avalancha. Por razones comprensibles, quienes estudian estos riesgos tienden a centrar su atención en los volcanes de los que existe un registro de actividad.

Ante el impulso de un fortísimo terremoto, cabe la posibilidad de que un volcán inactivo se hunda sin previo aviso. Tales avalanchas en frío pueden acarrear tanta destrucción como las principales erupciones. Por citar un ejemplo, en 1792 el flanco este del volcán Unzen, en el sudeste de Japón, colapsó en la bahía de Ariake; el tsunami consiguiente provocó la muerte a más de 14.500 personas. Mientras el relieve de un volcán cónico no se haya degradado y estabilizado por la erosión, puede considerarse candidato al hundimiento, se encuentre o no activo. Esta observación añade una nueva dimensión a la amenaza que los volcanes plantean a los habitantes del planeta, en particular a quienes viven a orillas del océano Pacífico, donde ambos, volcanes y terremotos, son fenómenos habituales.

Adaptaciones al buceo de la foca de Weddell

Pulmones plegables y un bazo que actúa a modo de escafandra parecen constituir algunos de los rasgos que permiten a esa foca nadar a mayor profundidad y aguantar más la respiración que la mayoría de mamíferos

Warren M. Zapol

La persona que nade sin ayuda hasta los 20 metros de profundidad y permanezca sumergido durante tres minutos será considerada un buceador experto. Sin embargo, tal proeza palidece cuando se compara con la de otro mamífero, capaz de hundirse a más de 500 metros y permanecer bajo el agua más de 70 minutos seguidos. Ese virtuoso del buceo es la foca de Weddell (*Leptonychotes weddelli*), un miembro de la familia Fócidos, es decir, de las focas genuinas, o carentes de orejas.

El animal, que vive en las costas y el hielo costero de la Antártida, se zambulle a gran profundidad en las gélidas aguas, no para establecer marcas de resistencia sino en busca de comida. A medio kilómetro de tierra, a unos 15 metros del suelo oceánico, que en ese punto se encuentra entre los 250 y 600 metros de profundidad, vive el componente principal de su dieta, el gran bacalao antártico *Dissostichus mawsoni*.

Las focas de Weddell soportan fácilmente temperaturas del agua inferiores a los −1,9 grados Celsius, en virtud de su gran tamaño (los adultos pesan de 350 a 450 kilogramos) y de una gruesa capa de grasa aislante. El buceo, que fuerza a los animales a enfrentarse con la falta de aire y con una intensa presión subacuática, constituye un desafío más complejo. En realidad, desentrañar las adaptaciones a ese reto ha requerido décadas de experimentos de laboratorio por parte de muchos investigadores y, más recientemente, una cascada de trabajos de campo. Estos últimos sugieren que algunas de las hipótesis basadas en estudios de laboratorio que hace tiempo se daban por buenas probablemente deban modificarse. Forzar a una foca confinada en un laboratorio a sumergir la cara bajo el agua no desencadena necesariamente la misma respuesta que insta una inmersión realizada libremente en el mar.

Los problemas específicos que plantea el buceo son considerables. Ante todo, la foca debe proporcionar oxígeno a sus tejidos. A la vez, debe limitar el aumento de los niveles sanguíneos de dióxido de carbono, un subproducto de la oxidación de la glucosa para la obtención de energía. El gas se genera en los tejidos y se transporta, por la sangre, hasta los pulmones, para su eliminación. Cuando el animal se halla sumergido, el gas puede acumularse en la sangre y alterar el delicado equilibrio de *p*H del fluido.

Debe evitar, asimismo, los múltiples daños que puede causarle la intensa presión. Por cada 10 metros de profundidad, la presión externa a que están sometidos los organismos crece una "atmósfera" (es decir, crece el equivalente al empuje ejercido a nivel del mar por una fuerza de 1,033 kilogramos sobre un centímetro cuadrado de superficie, o la presión de una columna de mercurio de 760 milímetros de altura). Un posible efecto de la presión subacuática es el aumento de la excitabilidad de las neuronas, que puede acabar en convulsiones. La presión comprime también las bolsas de aire, como es el caso de los senos aéreos de la cabeza humana. La compresión puede resultar dolorosa y, si el organismo no logra aportar aire suficiente a las bolsas para igualar la presión ejercida desde el exterior, los vasos sanguíneos podrían expandirse por los espacios aéreos y explotar.

La presión comprime los gases, lo que plantea un peligro cuando ello afecta al nitrógeno de los alvéolos, los diminutos sacos de gas de los pulmones. (Los fluidos corporales y los órganos llenos de fluido se comprimen mínimamente bajo el agua.) El nitrógeno gaseoso constituye alrededor del 78 por ciento del aire. En circunstancias normales pasa de forma inocua a la circulación, pero cuando el aire de los pulmones se somete a grandes presiones, como ocurre durante el descenso, el nitrógeno en exceso se disuelve en la sangre y los tejidos; puede entonces provocar narcosis, el trastorno que los buceadores llaman borrachera de las profundidades. Los síntomas de narcosis son intoxicación, pérdida de coordinación y visión, somnolencia e inconsciencia. Si el ascenso a la superficie es demasiado rápido la tensión de nitrógeno en la sangre y los tejidos puede superar la presión externa sobre el cuerpo; entonces, el nitrógeno disuelto abandona la solución y burbujea (embolia gaseosa). Además de producir dolor en las articulaciones y otros puntos, las burbujas de nitrógeno pueden bloquear vasos sanguíneos del cerebro y de la médula espinal, lo que llega a provocar parálisis e incluso la muerte.

A pesar de sus limitaciones, los estudios de laboratorio han revelado muchas de las estrategias por medio de las cuales la foca que bucea parece asegurar el aporte adecuado de oxígeno y evitar los trastornos citados. Pasaré primero revista a esas estrategias y luego se comentarán algunos casos en los que los estudios de campo contradicen o aclaran resultados anteriores.

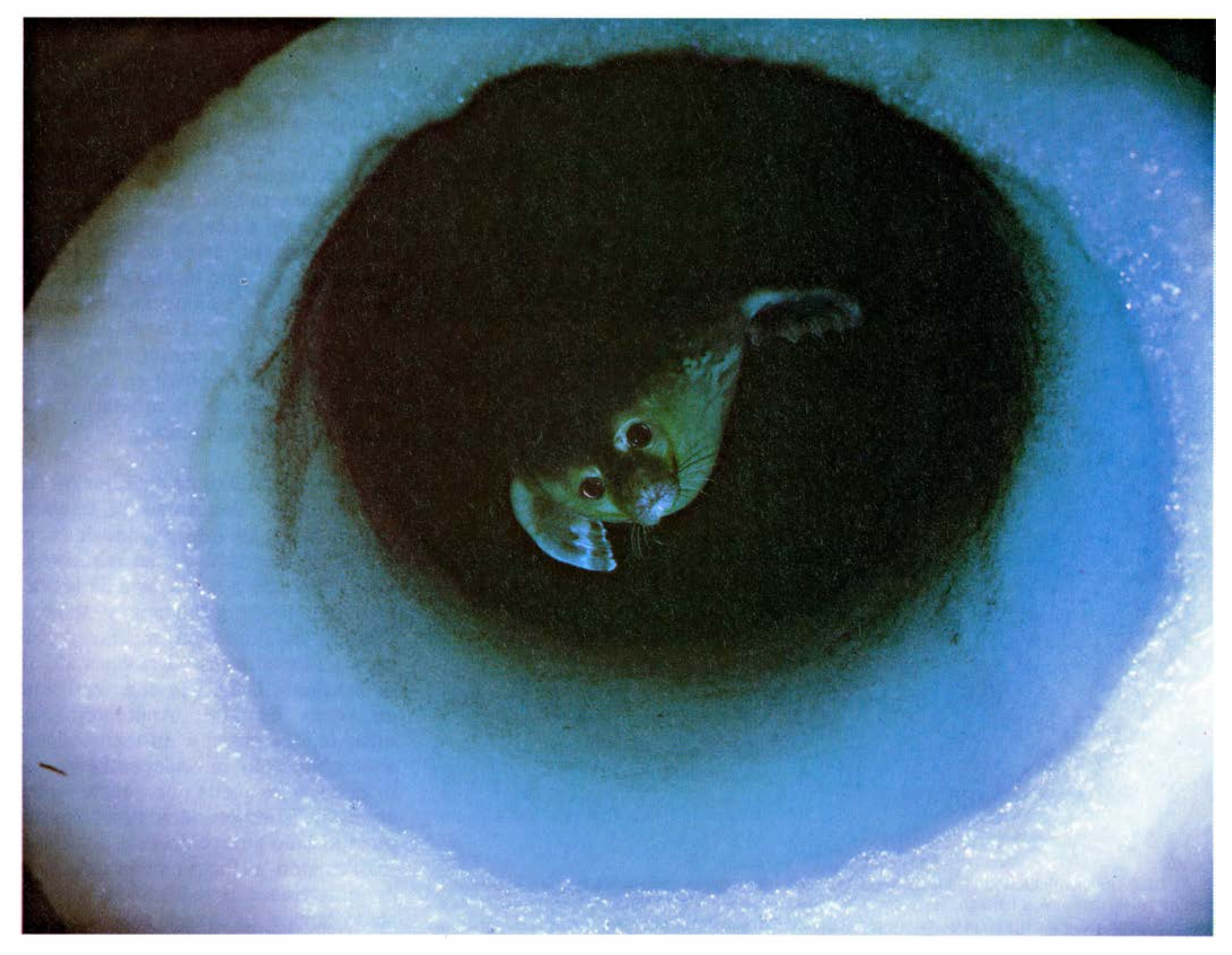
Uno de los descubrimientos de laboratorio más importantes y todavía incontestable es que la foca almacena gran cantidad de oxígeno: casi el doble por kilogramo de peso corporal que el ser humano. También concentra el oxígeno allí donde más se necesita durante las inmersiones: en la

sangre y, en menor medida, en los músculos. En el suministro de oxígeno, el ser humano depende particularmente de los pulmones, y en ellos mantiene el 36 por ciento de su contenido total, conservando el 51 por ciento en la sangre; pero la foca sólo da cabida a un 5 por ciento de oxígeno en los pulmones, y a un 70 por ciento largo en la sangre. Asimismo, una persona guarda sólo el 13 por ciento de su oxígeno en los músculos, mientras que la foca de Weddell conserva en ellos alrededor del 25 por ciento, ligado al pigmento mioglobina, que transporta oxígeno.

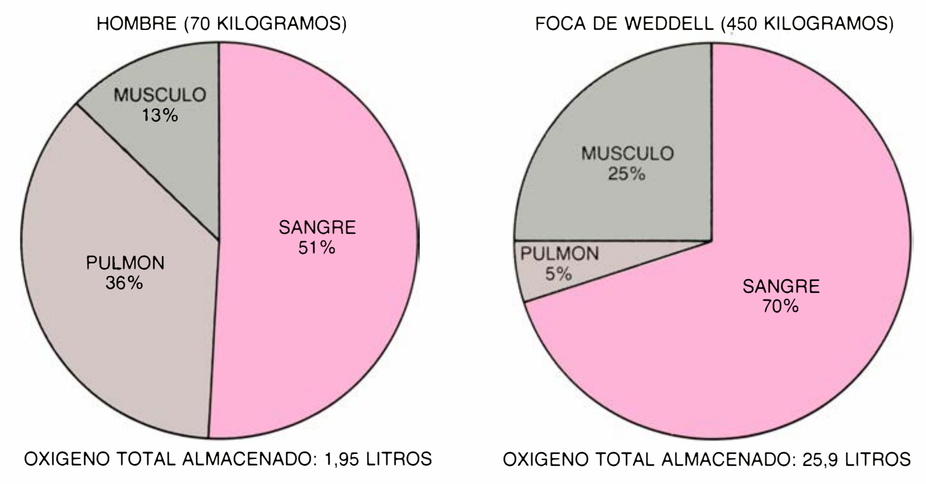
En parte, la sangre de la foca contiene grandes cantidades de oxígeno porque el volumen sanguíneo es enorme. En 1969, Claude J. M. Lenfant, a la sazón en la Universidad de Washington, descubrió que, en contraste con la sangre humana, que por norma supone sólo el 7 por ciento del peso del cuerpo, la sangre de la foca de Weddell alcanza el 14 por ciento del peso corporal. (La verdad es que dicha comparación subestima la cantidad de sangre disponible para los tejidos que trabajan, porque la grasa, que constituye alrededor de un tercio de la masa del animal, recibe poca sangre.) Además, la sangre de la foca contiene gran cantidad de hemoglobina, el pigmento transportador de oxígeno de los glóbulos rojos. Cuando mi grupo del Hospital General de Massachusetts extrajo sangre de focas del laboratorio, encontró que los glóbulos rojos suponían alrededor del 60 por ciento del volumen de cada gota; en los seres humanos esas células ocupan sólo del 35 al 45 por ciento del volumen.

Por impresionante que sea, el contenido total de oxígeno en la foca de Weddell no es infinito. Por ello, y al igual que otros animales buceadores, la foca ha ideado sistemas de conservación de su combustible. Cuando cualquier animal introduce la cara en el agua, el cerebro, instado por los impulsos nerviosos que le llegan, induce el llamado reflejo de buceo: si el animal deja de respirar, se produce bradicardia (un enlentecimiento del ritmo cardiaco) y determinadas arterias se constriñen, lo que limita la sangre que fluye a los órganos que riegan.

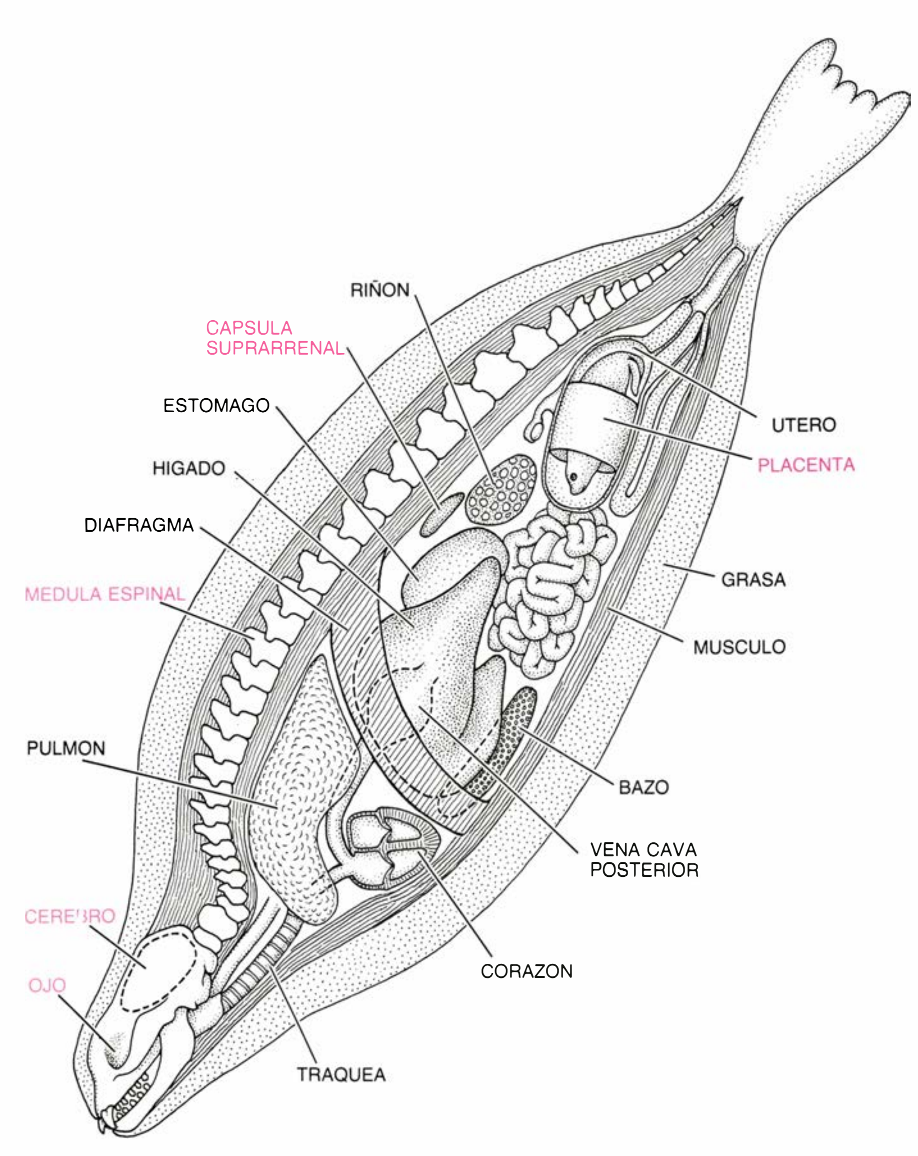
Desde hace más de 100 años se conoce ese rápido inicio de la bradicardia en los animales al comenzar una inmersión. También ocurre en los seres humanos, pero parece ser más profunda en especies que bucean habitualmente, como pinnípedos y cetáceos. Bajo el agua resulta beneficioso el ritmo cardiaco lento porque permite que el corazón trabaje menos y, por consiguiente, que demande menos oxígeno. La bradicardia restringe también la salida de sangre del corazón, cambio que ayuda a mantener la presión san-



1. FOCA DE WEDDELL que, después de una inmersión en el océano Antártico, retorna a un agujero abierto en el hielo por el hombre. La mayoría de esas inmersiones son viajes de pesca que duran alrededor de 17 minutos y llevan a los animales a profundidades de hasta 500 metros o más. Otras inmersiones duran más de una hora. Para sobrevivir aun a las incursiones breves el animal debe aportar oxígeno a sus tejidos y evitar trastornos asociados a la presión, como la narcosis de nitrógeno y la embolia gaseosa. Randall W. Davis, del Instituto de Investigación del Mundo Marino, de San Diego, tomó la fotografía.



2. DISTRIBUCION DEL OXIGENO en el hombre y en la foca de Weddell; resultan ser muy distintas. La foca almacena casi el doble de oxígeno por kilogramo de peso corporal que la persona. El animal se apoya menos también en los pulmones y mantiene un mayor almacén de oxígeno en la sangre y en los músculos.



3. TEJIDOS que continúan recibiendo cantidades normales de sangre cargada de oxígeno (*leyendas en color*) durante inmersiones en el laboratorio; incluyen la retina, el cerebro y la médula espinal, todos los cuales resultan esenciales para la navegación o el control motor. Las glándulas suprarrenales, que elaboran una hormona capaz de proteger al cerebro de la presión, reciben también un flujo normal, al igual que la placenta en las focas grávidas. Cuando ignoran el tiempo que permanecerán bajo el agua, las focas parecen prepararse para lo peor y reducen espectacularmente el flujo sanguíneo a muchos otros tejidos, incluido su extenso sistema muscular. De agotarse el oxígeno almacenado, los músculos obtienen energía conmutando a un metabolismo anaerobio, es decir, independiente del oxígeno, que aumenta los niveles de ácido láctico.

guínea en los niveles normales cuando se contraen las arterias. Además, a medida que disminuye el flujo sanguíneo, el metabolismo se enlentece, reduciéndose los requerimientos de oxígeno de los tejidos de todo el organismo.

La constricción de las arterias asegura probablemente que los tejidos que resultan de importancia decisiva para la supervivencia dispongan del máximo aporte de sangre y, por tanto, de oxígeno. Mis colegas y yo medimos recientemente el flujo sanguíneo dirigido hacia varios tejidos de la foca durante una inmersión de laboratorio. Encontramos que el suministro de sangre a la retina, cerebro y médula espinal, todos ellos vitales para la navegación y el control motor, se mantenían en el nivel normal, lo cual resultaba coherente con hallazgos anteriores. (Como era de esperar, el corazón recibía sangre, pero menos cantidad, para acompasarse al menor gasto del órgano.)

Otros dos tejidos continuaban beneficiándose también de un flujo normal: las glándulas suprarrenales y, en las focas grávidas, la placenta. Se ignora la razón exacta de por qué el cuerpo perfunde las suprarrenales, pero quizá tenga que ver con el hecho de que las glándulas elaboran gran cantidad de cortisol. Algunos indicios sugieren que esta hormona colabora en la estabilización de las neuronas durante las inmersiones, evitando con ello la aparición de convulsiones inducidas por la presión. Más obvio resulta por qué la sangre fluye a la placenta, órgano vital en el intercambio de gases fetales que debe persistir en su función para que sobreviva el submarino que hay dentro del submarino.

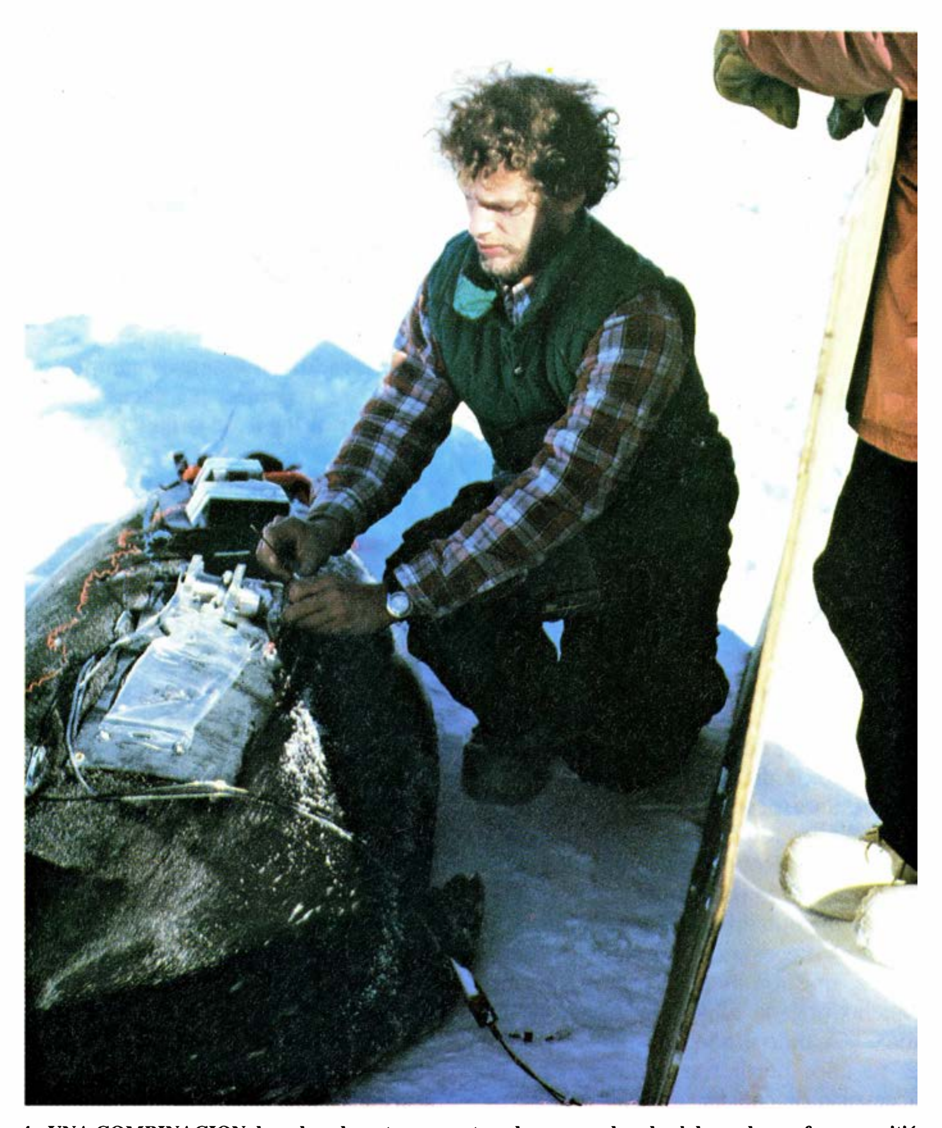
Nuestros estudios de distribución del oxígeno confirmaron también que, durante las inmersiones de laboratorio, la foca corta sustancialmente el flujo de sangre a la mayoría de los demás sistemas de órganos y tejidos. Cuando ese flujo cesa, muchos de los tejidos afectados (así los riñones) dejan de funcionar hasta que el animal sube en busca de aire. Aparentemente, otros tejidos pasan a un metabolismo anaerobio, esto es, independiente del oxígeno, si les queda por realizar tareas cruciales. El subproducto revelador del metabolismo anaerobio es el ácido láctico; cuando las focas emergen después de inmersiones forzadas, los niveles de ácido láctico en sangre superan a los propios del estado de reposo.

Es importante conmutar a un metabolismo anaerobio cuando falta oxígeno, pero ello puede resultar extre-

madamente peligroso. El aumento de los niveles de ácido láctico rebaja el *p*H de la sangre y puede provocar acidosis, que causa calambres, debilita la capacidad de contracción del corazón e incluso provoca la muerte. Los trabajos de laboratorio realizados por P. F. Scholander, de la Institución Oceanográfica Scripps, que estudió el reflejo de buceo en la década de 1930, indicaban que, durante las inmersiones de laboratorio, la foca evitaba la acidosis limitando el metabolismo anaerobio a los músculos esqueléticos y otros tejidos aislados del riego sanguíneo. Interrumpido el flujo sanguíneo, esos tejidos no podían liberar ácido láctico a la sangre hasta que el animal retornaba a la superficie; en ese momento, el hígado, los pulmones y otros órganos podían ya limpiar el subproducto.

Los experimentos de laboratorio han intentado asimismo explicar cómo se enfrenta la foca de Weddell a la presión externa. Por una parte se ha sugerido que la elevación de los niveles de cortisol podría evitar las convulsiones; por otra, se ha comprobado que la foca carece de los senos aéreos de otros mamíferos, fuente potencial de problemas. Del mismo modo, la foca dispone de recursos para evitarse la narcosis del nitrógeno y la embolia gaseosa. Sus pulmones son pequeños, para su peso, lo que reduce la capacidad de almacenar nitrógeno que podría difundirse a la sangre durante la inmersión. Además, el animal exhala antes de sumergirse. El efecto más aparente de esa práctica es reducir la flotabilidad, que dificulta el descenso, pero exhalar tiene el beneficio añadido de reducir más aún el volumen de gas contenido en los pulmones.

Durante la inmersión, la presión del agua sobre la caja torácica, deformable, del animal expulsa de los alvéolos, hacia el sistema de conducción de aire bronquial, la mayor parte del nitrógeno restante. Según estudios anatómicos realizados por Gerald L. Kooyman y sus colaboradores, de la Institución Scripps, los bronquios y bronquiolos de la foca están sostenidos por anillos de cartílago que permiten que el tracto aéreo actúe a modo de depósito acorazado de almacenamiento de aire. Puesto que esas conducciones, a diferencia de los alvéolos, no establecen contacto directo con la sangre, tampoco introducen nitrógeno en la circulación. (Ciertamente, algo de oxígeno se secuestra también en el tracto aéreo de la foca, pero no mucho; sólo el 21 por ciento del aire inhalado es oxígeno.) Los bronquios y bronquiolos de los humanos se cerrarían, en cambio, bajo la intensa presión, lo que les impediría almacenar el nitrógeno sobrante.



4. UNA COMBINACION de ordenador y tomamuestras de sangre adosado al dorso de una foca permitió a Roger D. Hill, del Hospital General de Massachusetts (*derecha*), al autor y a sus colegas medir las respuestas fisiológicas de las focas durante inmersiones marinas libres. Los trayectos que duraban menos de 17 minutos desencadenaban una respuesta menos espectacular que las inmersiones realizadas en el laboratorio.

Hace algunos años Kooyman determinó también, analizando inmersiones forzadas en una cámara de compresión, que los pulmones de la foca se hundían cuando el animal llegaba a los 50 o 70 metros de profundidad. El colapso de los pulmones detendría el flujo de nitrógeno hacia la sangre y limitaría la cantidad total de nitrógeno acumulado en ella.

Más recientemente, Kooyman y sus colaboradores han realizado estudios de campo que nos han obligado a muchos de nosotros a plantearnos si la foca responde del mismo modo a las inmersiones en el océano y en el laboratorio. Cuando el grupo de Kooyman analizó inmersiones voluntarias en el océano, los datos apuntaron a que los animales no siempre exhibían un reflejo de buceo puro. Pero esos primeros estudios no podían ser definitivos, pues el equipo de que se disponía no podía controlar inmersiones completas.

Roger D. Hill, del General de Massachusetts, redactó los programas y construyó un ordenador de ocho bits, alimentado por batería, que habría de permitir la evaluación de las respuestas fisiológicas y metabólicas de la foca en inmersiones libres en el mar; poco después, un grupo de investigadores de laboratorios de todo el mundo coincidimos en la estación de investigación que la Fundación Nacional estadounidense para la Ciencia mantiene en la costa del estrecho de McMurdo, en la Antártida. Con un poco de suerte, el ordenador portátil, que pesaba menos de un kilogramo y medio y tenía 64 kilobytes de memoria de acceso aleatorio, nos permitiría esclarecer hasta qué punto la foca de Weddell exhibía el reflejo de

buceo en su hábitat natural. También ayudaría a comprender cómo se las arreglaba la foca con la presión.

Salvo marcar el rumbo, la computadora de buceo de Hill, encerrada en una cápsula para que resistiera profundidades de 500 metros, hizo de todo. Durante varios días, y a intervalos predeterminados, registró el ritmo cardiaco y la profundidad. También controló una bomba eléctrica que tomaba hasta siete muestras de sangre arterial en momentos especificados (por ejemplo, 10 minutos después de haberse iniciado la inmersión) y a profundidades determinadas. Después de recoger las muestras la computadora bombeaba la sangre al interior de una bolsa o de jeringas atadas a un cable de fibra óptica de dos metros de longitud, que a su vez desempeñaba otras funciones cuando la foca emergía.

Capturamos focas de colonias cercanas y las transportamos en trineo hasta el lugar de estudio, un agujero de un metro de diámetro perforado a través de un espesor de hielo de dos metros. Aplicando una técnica inocua diseñada por Robert C. Schneider, del General de Massachusetts, anestesiamos a un individuo, le insertamos los catéteres necesarios y fijamos el ordenador, que iba atado a una lámina de caucho pegada al pelaje dorsal de la foca. (Cuando mudaron, más avanzado el verano, perdieron sin dificultad el accesorio de caucho.)

Equipada ya con el ordenador y recuperada de la anestesia general, la foca quedaba en libertad para penetrar en el agujero y salir nadando. Estábamos seguros de que volvería con muestras de sangre y datos porque adoptamos una táctica, bastante fiable, diseñada por Kooyman. Sabiendo que las focas de Weddell pueden nadar sólo unos cuantos kilómetros bajo el agua, estudió los animales en agujeros aislados perforados en extensos campos de hielo; para respirar, las focas tenían que volver al lugar de origen.

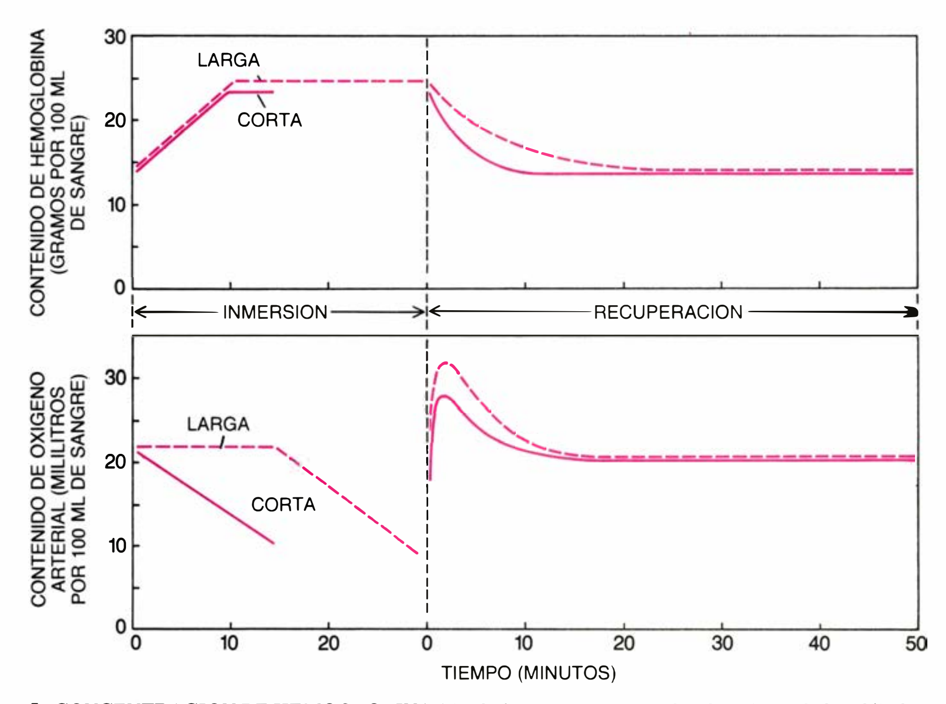
Después de la salida de un ejemplar, sobre el agujero colocábamos una cabaña de pesca (con un amplio círculo cortado en el suelo) que nos proporcionaba abrigo, a nosotros mismos y a un ordenador que posteriormente recuperaría los datos del ordenador de buceo. Cuando volvía la foca conectábamos de inmediato su cable de fibra óptica a la computadora fija. En 10 segundos la máquina recuperaba los datos almacenados en el ordenador de buceo y, en caso necesario, le daba nuevas instrucciones.

Encontramos, como antes lo hiciera Kooyman, que alrededor del 95 por ciento de las inmersiones voluntarias de la foca duraban menos de 20 minutos. Solía tratarse de inmersiones de alimentación, en las que el animal se dirigía directamente a su presa y volvía. Emprendían las inmersiones superiores a 20 o 30 minutos, el 5 por ciento de los casos, cuando exploraban rutas distantes o escapaban de los depredadores.

Estudiando la distribución, importantísima, de oxígeno a los tejidos, Peter W. Hochachka, de la Universidad de Columbia Británica, demostró que las focas no liberaban ácido láctico a la circulación durante o después de viajes por mar que duraran hasta 20 minutos: en las inmersiones cortas normales (es decir, la mayoría de viajes de las focas) los músculos no recurrían al metabolismo anaerobio que se había observado en las inmersiones de laboratorio y debían recibir algo de sangre. (Podría atribuirse a los músculos la procedencia de la mayor parte del ácido láctico en sangre, porque abundan y porque trabajan cuando el animal bucea.) Sin ácido láctico que descomponer después de la inmersión, o con muy poco, la foca suele volver a la pesca a los pocos minutos de tomar unas cuantas bocanadas de aire en la superficie.

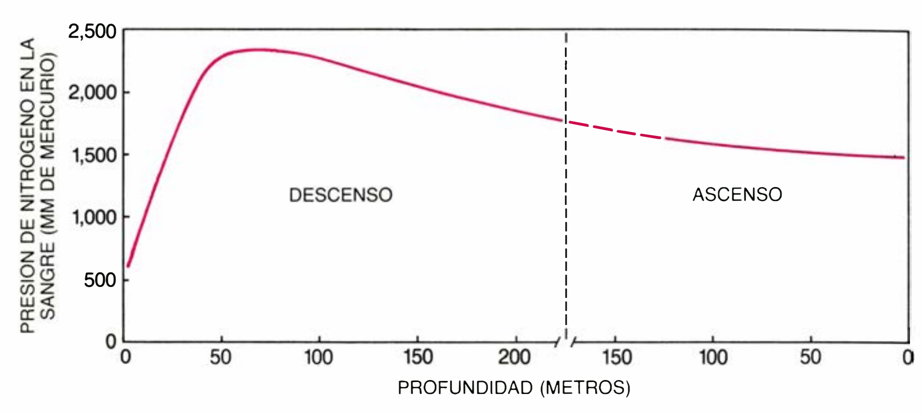
¿Cómo lograban las focas de Weddell aportar oxígeno a los músculos sin privar al cerebro y a otros tejidos vitales del suministro apropiado? Aunque nadie conoce todavía la respuesta, Hill encontró una pista. Observó que el ritmo cardiaco frenábase al comienzo de cada inmersión, pero sin mantenerse constante a lo largo de las excursiones más cortas; antes bien, se aceleraba y frenaba de acuerdo con la velocidad de natación de la foca, sin sobrepasar nunca el ritmo de reposo. Cuando se aceleraba el ritmo del corazón, también debía aumentar el gasto cardiaco. ¿A dónde se dirigía el exceso de sangre? Quizá se canalizara hacia el músculo esquelético. Si ése era el caso, la constricción total del flujo sanguíneo a los músculos que, según se ha dado por sentado durante mucho tiempo, caracterizaría a toda inmersión, en realidad no se produce en el curso de la mayoría de las inmersiones naturales.

En contraste con las inmersiones de alimentación, las ocasionales excursiones largas de la foca sí desencadenan la clásica respuesta de buceo que se observa en el laboratorio. Las incursiones prolongadas se caracterizan por una bradicardia profunda con poca variabilidad del ritmo cardiaco. Después de esas inmersiones (pero no durante ellas) la foca de Weddell libera ácido láctico a la sangre, señal de que el animal corta el flujo sanguíneo a sus músculos y ahorra prudentemente el oxígeno mientras bucea. Cuando conmuta a un metabolismo anaerobio en los músculos, la foca puede permanecer bajo el agua durante una hora o más. Pero paga un precio por ello: al emer-



5. CONCENTRACION DE HEMOGLOBINA (*a*), el pigmento transportador de oxígeno de los glóbulos rojos de la sangre; aumenta en la sangre durante los primeros 10 o 12 minutos de inmersiones voluntarias en el océano, lo que evita una caída brusca de los niveles de oxígeno en sangre (*b*). En excursiones que duran más de 17 minutos (*línea de trazos*), cuando los músculos pasan a un metabolismo anaerobio, la afluencia de hemoglobina a la sangre equilibra el consumo de oxígeno durante unos 15 minutos. En trayectos de menos de 17 minutos (*línea continua*), cuando los músculos parecen quemar oxígeno, la hemoglobina añadida no contrarresta completamente el consumo de oxígeno por parte de los tejidos y baja gradualmente su nivel.

ger por fin, no vuelve a bucear hasta que ha eliminado el ácido láctico liberado por los músculos, proceso en el que puede invertir hasta una hora. ¿Por qué, en el laboratorio, hasta las inmersiones breves desencadenan la respuesta característica de las inmersiones largas del mar? En el laboratorio, la foca, que no sabe cuánto tiempo estará sumergida, se prepara para lo peor.



6. PRESION DE NITROGENO en la sangre; deja de aumentar cuando las focas alcanzan una profundidad de 40 metros, lo que indica que los pulmones ya no liberan gas a la sangre; en realidad, se han plegado, o hundido. El plegamiento limita la cantidad de nitrógeno que puede penetrar en la sangre durante la inmersión, y con ello ayuda a proteger a la foca de la narcosis de nitrógeno y de la embolia gaseosa. A medida que la inmersión avanza, la absorción de nitrógeno por parte de músculos y grasa reduce más aún los riesgos.

Otros estudios de liberación de oxígeno indican que, al principio de ambos tipos de inmersiones en el mar, alimentarias y de exploración, la foca aumenta la concentración de glóbulos rojos en circulación, con lo que se maximiza el nivel de hemoglobina en la sangre y, con ello, la cantidad de oxígeno de que pueden disponer los tejidos. En un descubrimiento notable, Jesper Qvist, del Hospital Herlev de Copenague, que formaba parte de nuestro equipo antártico, encontró que la concentración de hematíes en las arterias aumentaba un 50 por ciento en los primeros 10 o 15 minutos de una inmersión. En contraste con los hallazgos de laboratorio de mi grupo, Qvist demostró que las células, que al principio sólo constituían del 35 al 40 por ciento del volumen de la sangre circulante, aumentaban durante la inmersión hasta el 60 por ciento. (Los niveles recuperan la normalidad a los 10 minutos de haber emergido el animal.)

¿De dónde procede esa avalancha de células? El bazo constituye una hipótesis razonable. Se sabe que este órgano, poco conocido, se contrae cuando se activa el sistema nervioso simpático, como ocurre en los mamíferos cuando bucean o se asustan. (En realidad, el miedo explicaría por qué en algunas focas se incrementan los niveles de glóbulos rojos cuando se hallan confinadas en el laboratorio.) La contracción del bazo inyectaría en el sistema venoso de la foca, que es muy dilatable, hematíes ricos en oxígeno guardados en almacén; el corazón los liberaría a la circulación arterial a medida que se necesitaran. Cuando la foca retornara a la superficie en busca de aire, los hematíes circulantes se recargarían fácilmente de oxígeno y se almacenarían de nuevo.

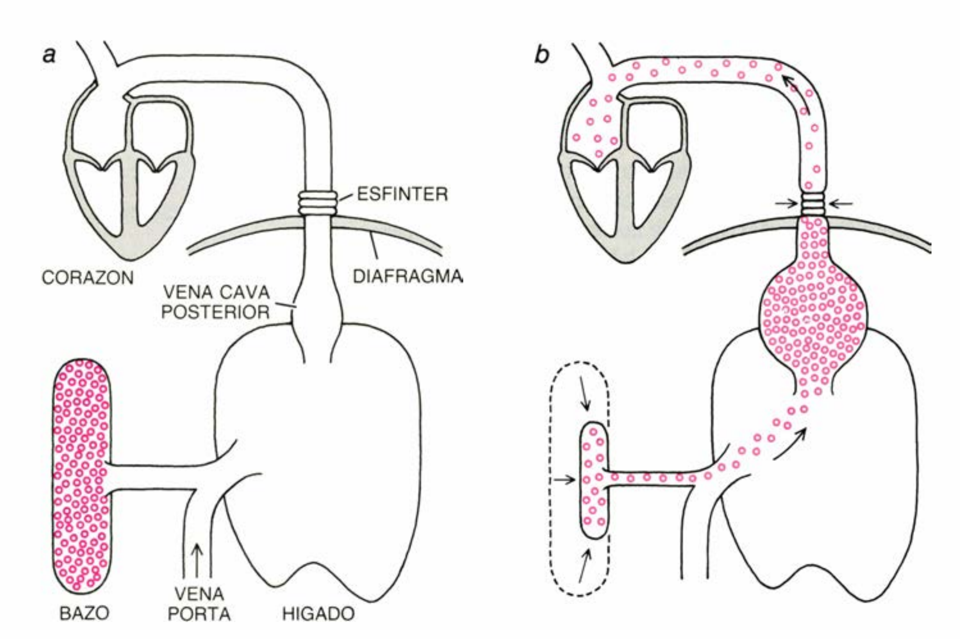
No carece de precedentes atribuirle al bazo el papel de suministrador de oxígeno; se sabe que en los caballos de carreras el órgano vierte hematíes a la circulación a los pocos minutos de que inicien un ejercicio intenso. En estudios anatómicos de varios mamíferos se han obtenido pruebas más directas de la importacia del bazo para la foca. Al comparar el peso del órgano con el del cuerpo encontré que el tamaño del bazo de la foca de Weddell era particularmente grande, igualado sólo por el del elefante marino del sur, otra especie que realiza inmersiones prolongadas. En los seres humanos, los perros e incluso los cetáceos misticetos, el órgano es bastante menor, respecto del volumen del animal. A partir del tamaño del órgano y del incremento de los niveles de hemoglobina durante la inmersión, mis colegas y yo estimamos que la foca de Weddell almacena aproximadamente el 60 por ciento del contenido total de hematíes en el bazo, mientras que el ser humano guarda en él menos del 10 por ciento. Por consiguiente, el bazo de la foca vendría a ser algo así como una escafandra autónoma contráctil, por su capacidad de almacenar y liberar el oxígeno necesario en las inmersiones.

Los efectos de la instilación de hematíes oxigenados se revelan con nitidez en las inmersiones prolongadas. Durante el período de aumento de la concentración de glóbulos rojos, el contenido de oxígeno en la sangre permanece constante, señal de que la cantidad consumida por el cerebro, el corazón y otros tejidos de importancia decisiva, se está sustituyendo. No se observa tal meseta en las inmersiones de alimentación, en las que los músculos consumen oxígeno; entonces, los niveles de oxígeno descienden paulatinamente. En este caso, el oxígeno quemado por los músculos de la foca sobrepasa, probablemente, la capacidad del sistema esplénico de almacenamiento de sangre para inyectar hematíes en la circulación.

Además de aportar oxígeno durante las inmersiones, la entrada de glóbulos rojos frescos en la circulación sirve, a buen seguro, para otra importante finalidad: la dilución de los gases disueltos en la sangre. Efecto que explicaría por qué la concentración de dióxido de carbono apenas aumenta en el curso de las inmersiones de campo. La dilución ayudaría asimismo a explicar por qué el nitrógeno no provoca narcosis o embolia gaseosa en la foca. Los estudios de campo sugieren también otras explicaciones. Por ejemplo, nuestro grupo internacional ha encontrado, como habían apuntado otros, que el pulmón se hunde, o pliega; y ello ocurre hacia los 40 metros de profundidad, algo antes de lo que se había predicho.

Determinamos la profundidad del colapso a partir de los trabajos de Konrad J. Falke, de la Universidad de Düsseldorf, quien, con grandes dificultades, midió la presión de nitrógeno en muestras de sangre extraídas de las arterias de focas en inmersión libre. (La presión constituye un buen indicador de la concentración de nitrógeno, porque la tensión sanguínea sube y baja con la concentración.) Falke encontró que la presión de nitrógeno en sangre, de 550 milímetros de mercurio cuando el animal respira en superficie, aumenta a medida que la foca desciende, y se eleva hasta un máximo de entre 2000 y 2400 milímetros cuando el animal alcanza los 40 metros. Más allá de esta profundidad, la presión se reduce. Creemos que el descenso en la presión que sigue al plegamiento de los pulmones no sólo responde a que el bazo infunde glóbulos rojos en la circulación, sino también a que se difunde algo de nitrógeno fuera de la sangre y hacia el interior de los músculos y la grasa.

A medida que estudiábamos las muchas y notables adaptaciones de las focas adultas en el estrecho de McMurdo nos interesaba cada vez más la respuesta del feto de la foca. ¿Exhibe éste



7. EL BAZO, enorme, de la foca almacena probablemente glóbulos rojos de la sangre ricos en oxígeno cuando respira aire en la superficie (*a*) y los inyecta en la circulación cuando se sumerge (*b*). Esa actividad explicaría los altos niveles de hemoglobina al comienzo de las inmersiones en el océano, según se ha descubierto. El autor sugiere que el bazo almacena alrededor de 24 litros de glóbulos rojos. Se contrae al iniciarse la inmersión, exprimiendo gran parte de su contenido en la vena porta, a través del hígado y hacia la vena cava posterior, dilatable. Un esfínter permite que el depósito libere glóbulos según van necesitándose.

un reflejo de buceo cuando la madre se sumerge en el mar? El trabajo de Robert Elsner, de la Universidad de Alaska en Fairbanks, había sugerido que podría ser así. Encontró que el ritmo cardiaco fetal, igual que el de la madre, decelerábase durante las inmersiones de laboratorio.

Todavía no hemos dado con la respuesta cabal a nuestra pregunta, si bien recogimos algunos datos cuando Graham C. Liggins, del Hospital Nacional Ginecológico de Auckland, y Hill lograron colocar un monitor del ritmo cardiaco en el dorso de una foca grávida. El ordenador mostró que, en efecto, el ritmo cardiaco del feto se reducía durante las inmersiones libres, pero que la disminución era más gradual y menos pronunciada que la de la madre; asimismo, el ritmo cardiaco se aceleraba de forma más gradual al emerger la madre. El feto "sabe" cuándo bucea su progenitor, si bien no está claro qué es exactamente lo que le informa de ello. Deberán efectuarse más estudios para determinar si las alteraciones adicionales del ritmo cardiaco fetal van acompañadas de cambios del gasto cardiaco y de la distribución del flujo sanguíneo. De ser así, el descubrimiento indicaría que el feto conserva oxígeno para sus tejidos vitales cuando la madre bucea, y que rellena su almacén en la superficie.

En conjunto, nuestros estudios de campo demuestran que las respuestas de la foca de Weddell a sus inmersiones prolongadas se parecen mucho a lo que las inmersiones de laboratorio predecían que serían. El reflejo de inmersión aparece en toda su fuerza: el ritmo cardiaco se hace más lento y permanece bajo a lo largo de toda la inmersión, y los músculos pasan del metabolismo aerobio al anaerobio, lo que indica que se ha cortado el aporte de sangre, probablemente debido a un estrechamiento arterial.

Por el contrario, en la mayoría de las inmersiones el perfil de actuación es muy distinto. Cuando la foca se aventura en una excursión de alimentación, la respuesta de inmersión se modifica. Se frena el ritmo cardiaco, pero es más variable, acelerándose cuando la foca nada más deprisa. Además, los músculos continúan fiando en el metabolismo anaerobio; aparentemente, siguen recibiendo algo de sangre, señal de que se modula la constricción vascular. Al principio de la inmersión la foca parece "decidir" si su incursión será larga o corta, y si recurrirá o no a medidas ahorro de oxígeno.

El mecanismo mediante el cual la foca toma la decisión es uno de los muchos enigmas que quedan por resolver. Ante el rápido avance que experimenta la tecnología de que hoy se dispone, quizá no tardemos mucho en dar respuesta a esa pregunta y conozcamos otros aspectos de las complejas adaptaciones de la foca de Weddell, una de las más impresionantes máquinas de bucear del mundo.

La máquina de conexión

La mayoría de los ordenadores tienen una sola unidad de procesamiento. En esta nueva computadora en paralelo, 65.536 procesadores trabajan a la vez. La velocidad así obtenida transformará el campo de la inteligencia artificial

W. Daniel Hillis

Los cambios experimentados por los ordenadores digitales en los tres últimos decenios han sido muy notables. Disponemos hoy de calculadoras de mano cuya potencia de cómputo exigía no hace mucho toda una sala llena de válvulas termoiónicas. Podemos ya realizar en segundos complejos cálculos que antes hubieran exigido días. Y, no obstante, en ciertos aspectos fundamentales, el diseño de los ordenadores ha permanecido invariable desde los días del ENIAC (una de las primeras máquinas digitales de gran tamaño, construida en la Universidad de Pennsylvania durante la segunda mitad del decenio de 1940) hasta la actual generación de superordenadores. La inmensa mayoría de los ordenadores modernos, desde los superordenadores a los microprocesadores, se asemejan al ENIAC en que la memoria y la unidad central de procesamiento constituyen, en ellos, entidades separadas. Para efectuar un cómputo es preciso tomar de la memoria los datos adecuados y trasladarlos hasta el procesador, donde se opera sobre los mismos, para finalmente devolverlos a la memoria.

Los diseños de este corte se denominan secuenciales, porque las operaciones de procesamiento se realizan de una en una. Las razones para la adopción del diseño secuencial fueron esencialmente utilitarias. En los primeros tiempos de la computación digital la memoria y la unidad central de procesamiento estaban construidos con materiales diferentes. Dado que la memorización era más barata que el procesamiento, resultaba deseable maximizar la eficiencia de la unidad de procesamiento, aunque fuera a expensas de la eficiencia de la memoria. Y eso es precisamente lo que hace el diseño secuencial. Sin embargo, en nuestros días la memoria y el procesador central son microcircuitos que se fabrican a partir de unas mismas obleas de silicio y por idénticas técnicas de trazado y grabación. En un ordenador típico, más del 90 por ciento de este silicio está dedicado a memoria. Y aunque el procesador central está maravillosamente bien ocupado, el grueso del resto ha de permanecer casi constantemente ocioso. Dado que el precio del silicio procesado, empaquetado y convertido en microcircuitos ronda en torno al millón de dólares por metro cuadrado, parece recurso demasiado caro para desperdiciarlo con tanta alegría.

Como salta a la vista, la solución general de este problema consistiría en hallar un procedimiento para unificar memoria y capacidad de procesamiento. Mas, ¿cómo hacerlo? Una solución consiste en valerse de muchos procesadores pequeños en funcionamiento simultáneo, provistos cada uno de una pequeña memoria propia. En un diseño de este estilo, denominado de procesamiento en paralelo, resulta posible utilizar con gran eficiencia ambas capacidades: la de memoria y la de procesamiento. Tal es el enfoque que hemos adoptado mis colegas y yo al construir una computadora de procesamiento en paralelo, llamada "máquina de conexión". La máquina de conexión se vale de 65.536 procesadores sencillos. La potencia de cada uno de estos procesadores es muy inferior a la de un ordenador personal típico; pero dispuestos en tándem ejecutan varios miles de millones de instrucciones por segundo, velocidad de operación que convierte a la máquina de conexión en una de las computadoras más rápidas que jamás se haya construido.

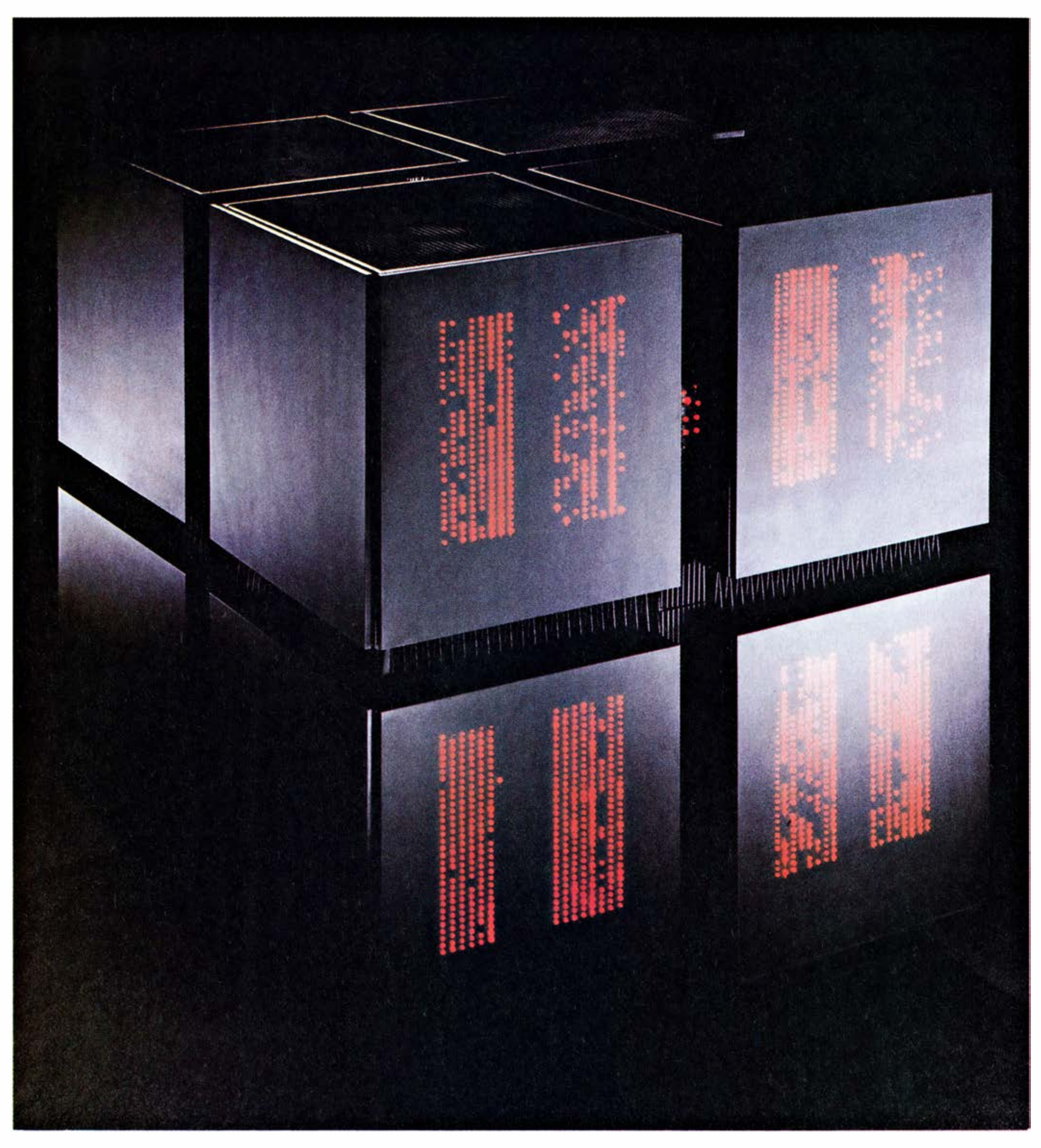
Pero no es su fuerza bruta lo más interesante de la máquina de conexión, sino su flexibilidad. Se han creado ya otras computadoras de procesamiento en paralelo para aplicaciones especiales, algunas de ellas sumamente rápidas. No obstante, a modo de sabios idiotas, tales máquinas resultan de ordinario torpes al hacerlas funcionar fuera de su especialidad. La máquina de conexión, por el contrario, puede funcionar hasta el límite de su capacidad de procesamiento en una amplia gama de aplicaciones. Como describiremos en este artículo, la clave de tal flexibilidad se encuentra en una red de comunicaciones que permite el intercambio de información entre la multitud de procesadores en la configuración que mejor se adapte al problema de que se trate. La máquina de conexión no es un mero prototipo. Hay ya en explotación comercial alrededor de una docena de ellas, que han empezado a cambiar los métodos de tratamiento con que la computación digital afronta los problemas de física, de procesamiento de imágenes, de recuperación de textos e, incluso, los de la inteligencia artificial.

La comparación entre las formas con que tratan una misma imagen el cerebro y un ordenador convencional puede ayudarnos a comprender los beneficios que comporta el procesamiento en paralelo. A partir de las dos imágenes bidimensionales que se proyectan sobre las retinas de sus ojos, un ser humano es capaz, aparentemente sin esfuerzo, de reconstruir un modelo tridimensional del mundo y mantener y actualizar tal modelo al tiempo que las imágenes bidimensionales van cambiando de prisa. Resulta posible programar ordenadores para que lleven a cabo parte de esta tarea, pero incluso máquinas muy rápidas requieren horas para realizar lo que el cerebro humano realiza en fracciones de segundo [véase "Visión por humanos y por máquinas", por Tomaso Poggio; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1984]. El cerebro conserva su ventaja a pesar de que sus componentes (las neuronas) son millones de veces más lentas que los transistores del ordenador.

¿Por qué motivo, pues, es el cerebro mucho más veloz que el ordenador? Aunque todavía no se han logrado de-

sentrañar por completo los "circuitos" visuales del cerebro, sí ha quedado claro que ciertas zonas de éste operan de conformidad con los principios del procesamiento en paralelo. En tales regiones cerebrales se procesa de una sola vez la imagen entera. El ordenador, por el contrario, examina la imagen a razón de un puntito por vez, como si la estuviera observando a través del ojo de una diminuta cerradura. En el seno del ordenador, la imagen se representa mediante una tabla de números, correspondientes cada uno a la intensidad de la luz de un punto particular. Una matriz típica de este estilo podría ser un cuadrado de 256 puntos de lado. Los ordenadores corrientes procesan cada vez tan sólo uno de estos 65.536 puntos. Por tanto, una operación de procesamiento de una imagen, por sencilla que sea, requiere al menos 65.536 pasos.

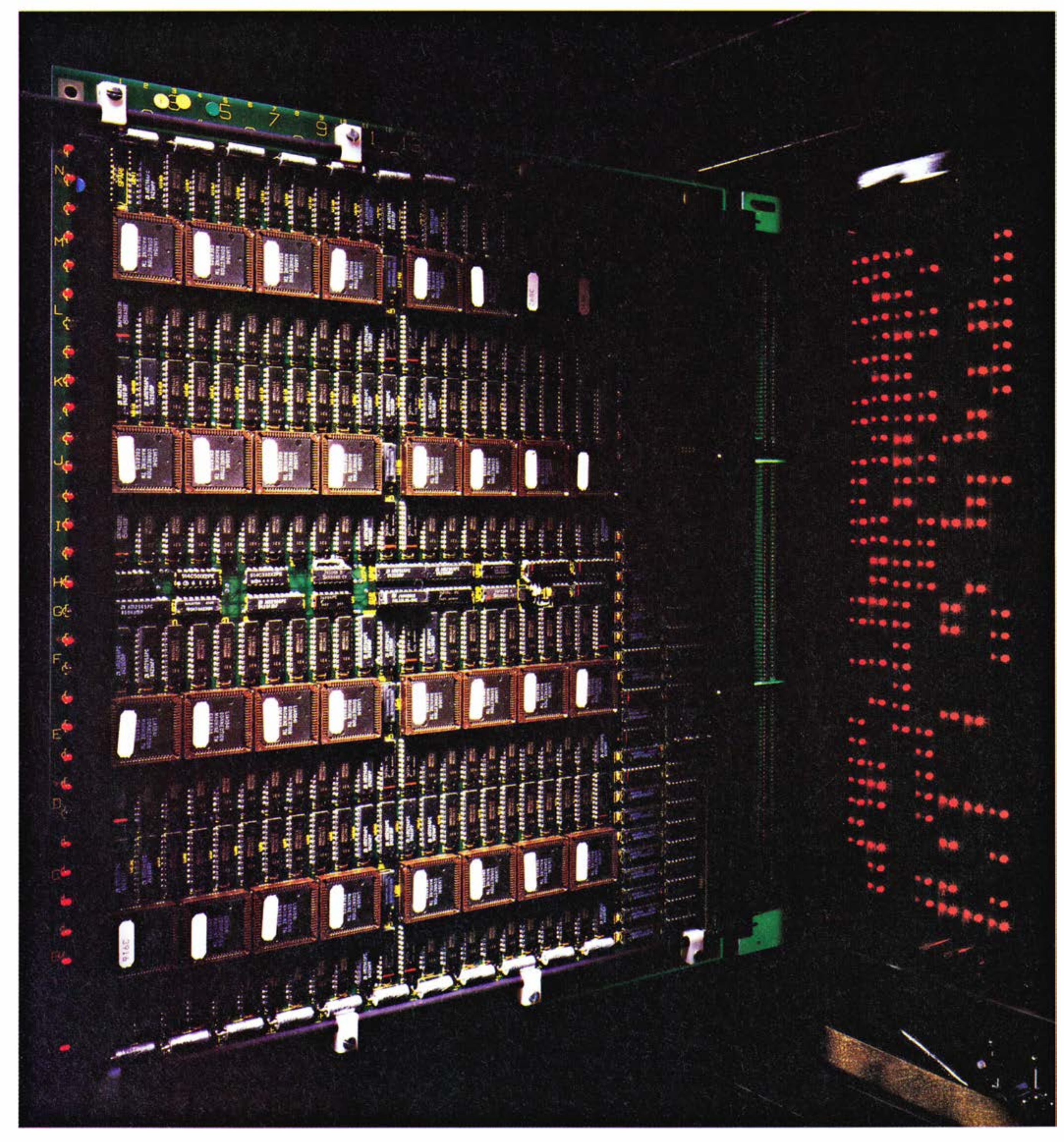
La máquina de conexión, por el contrario, asigna a cada punto de la imagen un procesador individual. Dado que cada operación puede ser efec-



1. LA MAQUINA DE CONEXION es un cubo de 1,5 metros de lado, compuesto por ocho subcubos. Cada subcubo contiene 16 placas de circuito impreso, dispuestas verticalmente. En cada placa hay 32 microcircuitos hechos sobre pedido, cada uno de los cuales consta de 16 procesadores más una pequeña cantidad de memoria asociada. La luces rojas indican el estado de los microcircuitos y sirven para la detección de averías. Al operar en paralelo, los 65.536 procesadores ejecutan varios miles de millones de operaciones por segundo, lo que convierte a la máquina de conexión en el más rápido de los ordenadores.

tuada simultáneamente sobre todos los puntos, los cálculos en los que haya de actuarse sobre la imagen completa son igual de rápidos que aquellos otros que solamente afecten a un punto. Por ejemplo, para hallar todos los puntos de la imagen cuyo brillo supere un determinado valor mínimo, la máquina secuencial ha de examinar uno por uno 65,536 minúsculos elementos, y comparar el brillo de cada elemento con el valor umbral. En la máquina de conexión, tal comparación la realizan simultáneamente 65.536 procesadores, que operan cada uno sobre un único elemento de imagen.

La comparación con un umbral resulta de singular sencillez, ya que cada procesador puede llevarla a cabo independientemente de los demás. Sin embargo, en la mayoría de los cómputos interesantes es preciso que los procesadores intercambien información durante la ejecución de la tarea. Tomemos como ejemplo una operación frecuente en el procesamiento de imágenes, denominada convolución. La convolución crea imágenes difuminadas merced a un proceso de promediación de cada punto con sus vecinos más cercanos en la malla bidimensional. (La operación de convolución, similar a algunas de las realizadas por el sistema visual humano, resulta útil para eliminar objetos pequeños e insignifi-



2. PLACAS de la máquina de conexión: pueden extraerse lo mismo que un libro de un estante. Los objetos cuadrados son los microcircuitos, dotados cada uno de 16 procesadores. Los objetos rectangulares son unidades de memoria y dispositivos para encaminar las comunicaciones entre los procesados instalados.

cantes y para destacar con mayor claridad los rasgos importantes.)

Para dejar completa una convolución, cada procesador tiene que leer un valor de los procesadores que almacenan información relativa a los puntos situados a la izquierda, la derecha, por encima y por debajo del punto en cuestión. En efecto, los procesadores tienen que "hablar" unos con otros. Una forma de lograr la red de comunicaciones necesaria consistiría en conectar los procesadores según una malla o cuadriculado bidimensional. Dado que cada procesador tendría que estar conectado con sus cuatro vecinos inmediatos, el cuadriculado se corresponde directamente con las líneas de comunicación precisas para la convolución. Tanto así, que ciertas computadoras en paralelo, especialmente diseñadas para el procesamiento digital de imágenes, están conectadas según un cuadriculado bidimensional. Esa organización funciona bien para la convolución, pero no para otros tipos de cómputos.

Por ejemplo, el montaje más conveniente para la determinación de la intensidad media del conjunto de todos los puntos de la imagen remeda a una especie de árbol invertido. La intensidad media de una imagen compuesta por 65.536 puntos puede calcularse hallando primero el promedio de cada par de puntos; después, el promedio de cada par de pares, y así sucesivamente. El promedio deseado se obtiene en 16 pasos. En las últimas etapas, tal cómputo requiere un intercambio de información entre puntos muy separados en la imagen; por consiguiente, el cableado mediante cuadriculado bidimensional no resulta adecuado en este caso.

Los principios generales a deducir de estos ejemplos son que cada tipo de cómputo puede requerir sus propias reglas de conexión y que puede ocurrir que cada procesador haya de conectarse con cualquier otro. Por consiguiente, al proyectar la máquina de conexión elegimos una red de comunicaciones en la cual cada procesador puede comunicarse con cualquier otro. Gracias a tan gran flexibilidad, el programador puede elegir el algoritmo más adecuado para el problema al caso, sin tener que preocuparse de limitaciones impuestas por la red de conexiones.

La unidad básica de la máquina de conexión, repetida sistemáticamente, es un circuito integrado compuesto por 16 pequeños procesadores más un dispositivo encargado de dirigir las comunicaciones. Cada una de las unidades de procesamiento está asociada con 4096 bits de memoria. (Un ordenador personal típico tiene 256.000 bits o más.) Los 16 procesadores, grabados sobre una misma laminilla de silicio, están encapsulados en una pastilla ("chip"). Estas pastillas se montan en grupos de 32 sobre una placa de circuito impreso. La máquina contiene 128 placas de circuito impreso, dispuestas formando un cubo de 1'5 metros de lado. Al objeto de facilitar la localización de averías, cada pastilla está conectada a un indicador luminoso situado en el borde de la placa donde está montado; durante el funcionamiento de la máquina, las luces crean curiosas pautas en la cara frontal del cubo.

Los 16 procesadores de cada pastilla están conectados mediante un conmutador que permite crear una conexión directa entre cualquier par de unidades de procesamiento. Para establecer conexiones directas entre cualesquiera dos de los 65.536 procesadores que componen el sistema serían necesarias más de 2000 millones de líneas, lo cual crearía enormes dificultades de orden práctico. En lugar de eso, los dispositivos de comunicaciones de las pastillas están conectados, cada uno, con otros 12. La organización de las conexiones de estos dispositivos es el llamado "cubo booleano *n*-dimensional", o más brevemente, *n*-cubo. El *n*-cubo es una versión generalizada del cubo tridimensional ordinario; posee excelentes propiedades como red de comunicaciones entre procesadores.

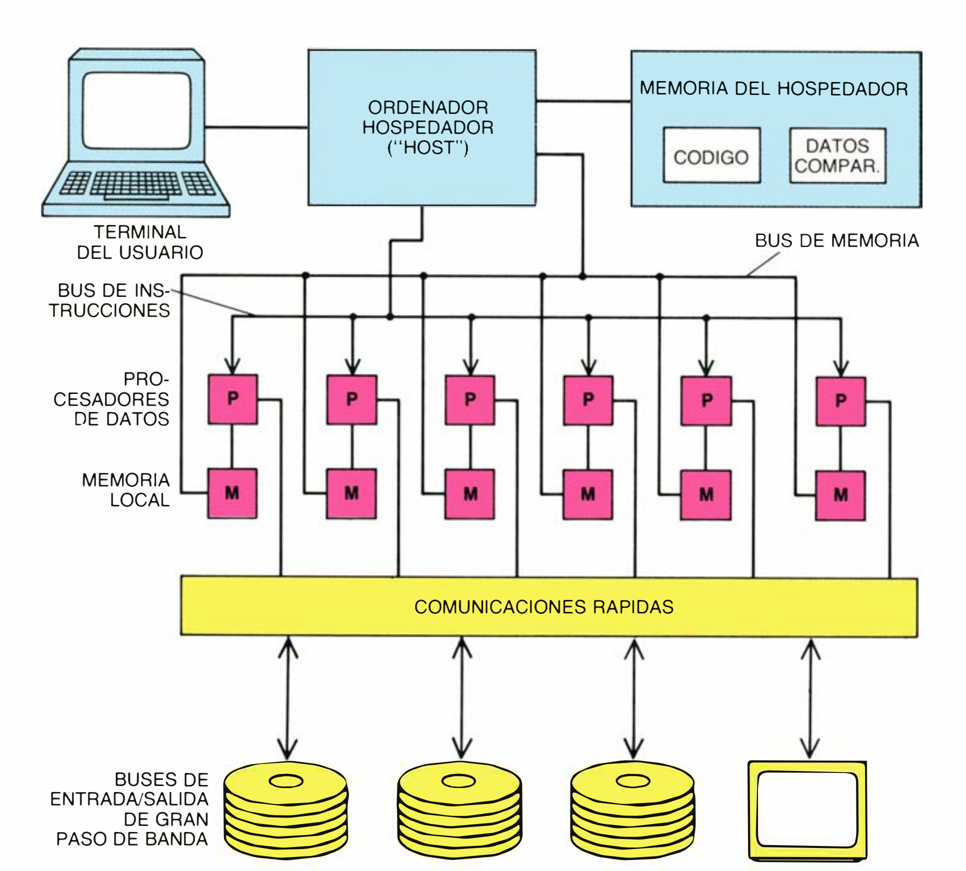
La detallada exposición matemática del *n*-cubo excede un poco del alcance de este artículo, pero sus rasgos generales no son difíciles de comprender. Podemos imaginar al cubo tridimensional ordinario como uno de los miembros de una serie de "cubos" de diferente dimensión espacial. Así, por ejemplo, se podría considerar que el segmento rectilíneo es el cubo 1-dimensional, o 1-cubo. Al unir dos 1-cubos por sus extremos se obtiene un cubo de dimensión 2, el cuadrado, o 2-cubo. Al conectar los vértices de dos 2-cubos resulta un 3-cubo, el cubo tridimensional ordinario. Lo mismo que antes, al unir por sus vértices dos cubos tridimensionales se obtiene un cubo tetradimensional, o 4-cubo [*véase la figura 4*]. Podemos repetir este proceso indefinidamente, y demostrar sin dificultad que un 12-cubo consta de 2^{12} (o sea, 4096) vértices, es decir, uno para cada uno de los microcircuitos encapsulados de que consta la máquina de conexión.

Son varias las razones que confieren al *n*-cubo booleano su valor como esquema de organización de conexiones. En primer lugar, ningún cubo se encuentra alejado más de 12 tramos de líneas de conexión de cualquier otro, lo que facilita las comunicaciones dentro de la red. En segundo lugar, el diseño del *n*-cubo está bien adaptado a la lógica binaria del ordenador. En un ordenador digital todos los datos se almacenan en forma de ristras de bits, cada uno de los cuales tiene un valor sea de 0, sea de 1. Ahora bien, cada uno de los cubos del *n*-cubo posee dos subcubos, que podemos designar por 0 y 1, respectivamente. En consecuencia, cada uno de los puntos del *n*-cubo tiene una única dirección, especificada por una ristra de 12 dígitos binarios. El primer bit de la ristra especifica cuál de los cubos 11-dimensionales que componen el 12-cubo es el que contiene el punto deseado. El segundo bit especifica de cuál de los 10-cubos se trata, y así sucesivamente, hasta dejar determinado un único punto.

Estas direcciones binarias pueden aprovecharse para encaminar mensajes entre las 4096 pastillas de microcircuitos que hay en la máquina de conexión. Cada uno de los mensajes que circulan por el sistema porta tal dirección. Al recibir el mensaje, el dispositivo de direccionamiento va examinando uno por uno los bits de la dirección, y procede a encaminar el mensaje hacia el siguiente dispositivo de direccionamiento de la ruta. Este, a su vez, recibe el mensaje, examina la dirección y lo encamina nuevamente. Así pues, en ningún caso serán necesarios más de 12 pasos para llevar cualquier mensaje hasta su destino.

Son varias las características de esta red de comunicaciones que aumentan su velocidad y flexibilidad. La organización en cubo *n*-dimensional cuenta con una valiosa propiedad: entre cada par de procesadores hay muchas vías de comunicación igualmente eficientes. Si una de tales vías está ocupada ya por una comunicación en curso, el dispositivo de direccionamiento tiene libertad para elegir una ruta alternativa sin más que procesar los bits de la dirección en orden diferente [*véase la figura 5*].

El sistema de comunicaciones tiene una flexibilidad de otro tipo, también intrínseca. En algunos casos la red de comunicaciones funciona más o menos como una central telefónica : establece un circuito entre dos procesadores de forma que puedan comunicarse conti-



3. MUESTRA EL DIAGRAMA DEL SISTEMA que la máquina de conexión funciona en asociación con un ordenador convencional, llamado hospedador ("host"). Los usuarios se relacionan con el hospedador a través de un lenguaje normal de programación, modificado para la programación en paralelo. Sin embargo, en lugar de encargarse de efectuar las operaciones repetitivas a razón de una por vez, el hospedador se las encomienda a la máquina de conexión, en la cual las operaciones se realizan en paralelo. Los resultados pueden obtenerse mediante diversos dispositivos de entrada y salida, monitores de vídeo, por ejemplo.

nua y exclusivamente. En casos complicados, no obstante, los mensajes pueden ser tan largos, y estar el sistema tan saturado, que los comunicadores han de comportarse de modo similar a las oficinas de correos, almacenando paquetes de información que serán cursados posteriormente. Las decisiones pertinentes quedan a cargo de los comunicadores basándose en las líneas disponibles en el momento de tener que hacer la transmisión.

Las propiedades explicadas permiten que la máquina de conexión establezca muchas pautas de comunicación diferentes, dependiendo del problema que tenga entre manos. Una importante característica del sistema es que tales detalles le son invisibles al usuario, quien tiene tan poca necesidad de comprender los *n*-cubos booleanos como el usuario normal del teléfono de comprender los principios de la conmutación digital. (Tanto así, que las futuras versiones de la máquina podrán tener esquemas de cableado distintos, sin que ello afecte para nada a los algoritmos utilizados.) El programador interactúa con la máquina de conexión a través de un ordenador convencional –denominado "hospedador" (host, en inglés)– utilizando un sistema operativo y un lenguaje de programación del tipo habitual. El enlace entre los procesadores de la máquina de conexión y el ordenador hospedador se hace de forma muy similar a como conectaría una unidad de memoria ordinaria.

Más todavía, podría decirse que, en cierto sentido, la máquina de conexión es la memoria del hospedador. Merced a esta relación resulta posible integrar de forma sencilla el procesamiento en paralelo con la programación informática ya existente. Los programas para la máquina de conexión son sorprendentemente similares a los programas tradicionales. La diferencia principal es que muchas operaciones que normalmente se realizan mediante bucles repetitivos quedan reemplazadas por operaciones simples a causa del funcionamiento simultáneo de muchos procesadores de la máquina de conexión; los circuitos de comunicaciones y direccionamiento establecen automáticamente las vías de comunicación necesarias.

Es preciso hacer notar que en ningún lugar de este sistema se utilizan exóticos dispositivos de soporte físico ("hardware"). Al diseñar la máquina de conexión optamos por recurrir a tecnologías bien probadas, buscando simplicidad y fiabilidad. En comparación con los ordenadores más rápidos de nuestros días, los procesadores individuales son relativamente lentos. El microcircuito especial que los aloja, hecho a la medida, por así decirlo, se construye mediante procedimientos similares a los utilizados para ordenadores personales y calculadoras de bolsillo. No obstante, la potencia conjunta de los 65.536 procesadores proporciona a la máquina una velocidad muy grande. En muchas aplicaciones la máquina es capaz de realizar más de 2000 millones de operaciones por segundo; en las aplicaciones más favorables tal cifra supera los 10.000 millones, es decir, unas 1000 veces más que un ordenador grande típico, de los de marco principal ("mainframes").

Para hacernos idea de la velocidad de la máquina en un contexto ligeramente diferente podríamos examinar su funcionamiento en las operaciones de "coma flotante", operaciones que definen una norma para medir la potencia de cómputo en las aplicaciones científicas que requieren grandes volúmenes de cálculo. Una operación típica en coma flotante puede ser la multiplicación o división de dos números expresados en notación científica (del tipo del $1,5 \times 10^2$). Un superordenador típico puede efectuar unos cientos de millones de operaciones en coma flotante por segundo; la máquina de conexión puede efectuar alrededor de 2500 millones.

¿Qué aplicaciones se le han dado a esta considerable capacidad de machacar números? Como hemos sugerido, algunas de las aplicaciones iniciales han consistido en la manipulación y procesamiento de imágenes. Otras se han valido del intrínseco paralelismo de ciertos procesos físicos. El problema ingenieril de calcular el flujo aerodinámico que sobrepasa un ala de aeroplano o un rotor de helicóptero proporciona un buen ejemplo del modo en que la máquina de conexión puede reflejar el paralelismo de la naturaleza.

En la naturaleza, las leyes a que obedece el flujo global son fruto de una miríada de interacciones entre las moléculas del aire, que al pasar rápidamente en torno al ala chocan y golpean unas contra otras y contra la superficie alar. El ingeniero (que se interesa por el flujo global y no por las interacciones moleculares específicas) se vale de un

modelo macroscópico, simplificado, que se concreta en un sistema de ecuaciones diferenciales parciales. No obstante, las ecuaciones mismas forman un sistema en paralelo, pues al resolverlas lo que se hace es tratar los cambios de presión de minúsculos volúmenes de aire y sumar sus interacciones, al objeto de obtener el flujo global. Dado que las ecuaciones vienen en paralelo, su resolución con la máquina de conexión es rápida y eficiente.

Sin embargo, con un ordenador que funciona en paralelo puede irse más allá de las meras ecuaciones y acercarse más a la realidad física subyacente. El comportamiento macroscópico de un fluido es, en gran medida, independiente de las propiedades físicas de las partículas individuales. Además, el comportamiento cualitativo del fluido apenas sufre alteración al reducir mucho el número de partículas. Así, es posible reproducir flujos macroscópicos examinando las colisiones de unas decenas de millones de partículas simples generalizadas.

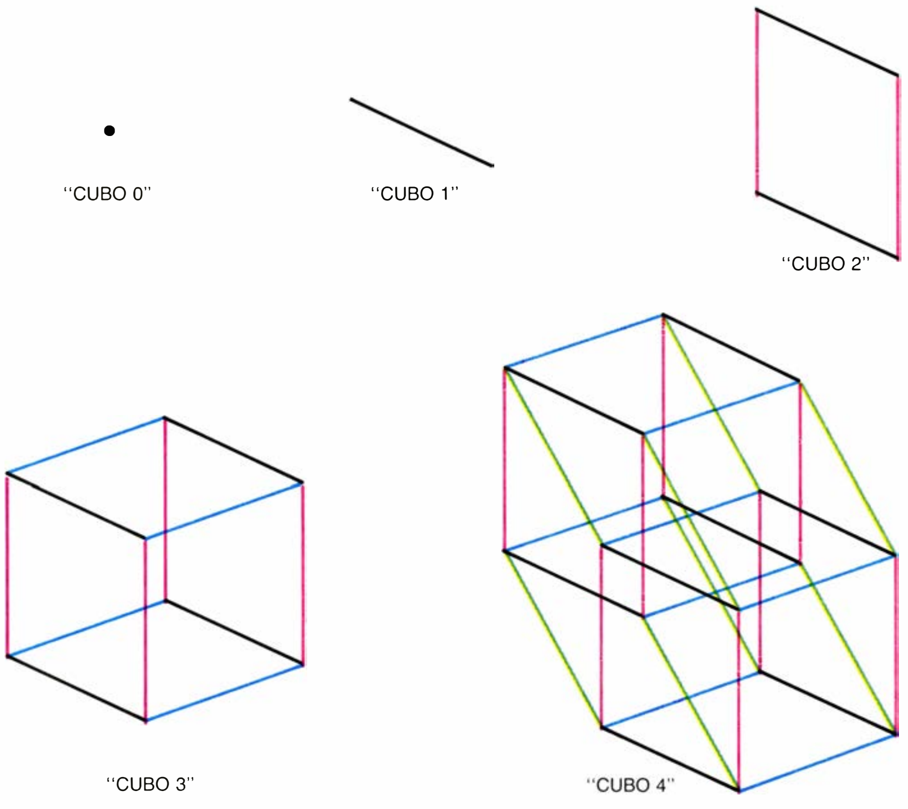
Stephen Wolfram, del Centro de Investigación de Sistemas Complejos, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y mi colega James Salem se valieron de esta técnica para construir modelos de comportamiento de fluidos sobre superficies complejas. En la simulación que efectuaron intervenían sólo unas pocas decenas de millones de partículas, bastante burdas, por otra parte, pues cada una de ellas sólo podía moverse en seis direcciones, y sus velocidades tenían que ser números enteros. A pesar de ello, el sistema es capaz de remedar con exactitud el curso de un fluido.

El procedimiento más sencillo y lógico de efectuar la computación del comportamiento de un fluido consistiría en asignarle un procesador individual a cada partícula. Empero, una simulación típica hace participar alrededor de ocho millones de "partículas", y la máquina de conexión, a pesar de sus vastas proporciones, tan sólo dispone de unos 65.000 procesadores. La solución de esta dificultad y de otras análogas consiste en programar cada procesador para que actúe como si fuera una cadena de unidades de procesamiento, estando cada unidad encargada de controlar una partícula por vez. Lo mismo que antes, los detalles de organización le son invisibles al programador, quien se limita a especificar cuántos "procesadores virtuales" resultan necesarios. Los dispositivos electrónicos y el sistema operativo se encargan de todo. Evidentemente, al tener el procesador que ir simulando por turno cada una de las 250 partículas, el cómputo requiere un tiempo 250 veces mayor que si se dispusiera de un procesador por partícula.

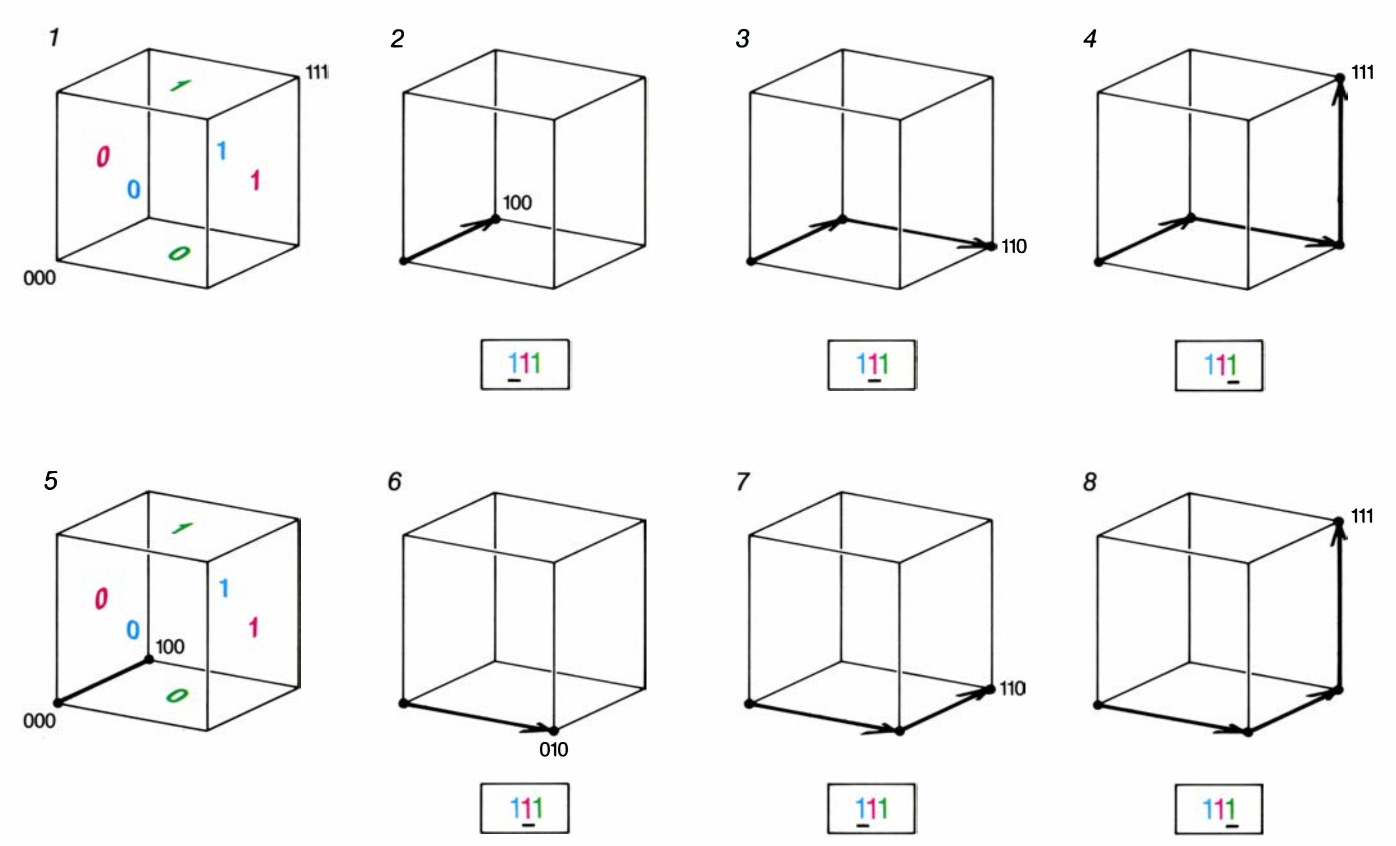
Son muchas las aplicaciones interesantes de la máquina de conexión en las que no se utilizan números. Mis colegas Brewster Kahle, Craig Stanfill y David Waltz se valieron del funcionamiento en paralelo de la computadora para la localización de documentos perdidos en grandes colecciones de textos. El principio en que se funda su sistema consiste en la posibilidad de programar cada procesador para que compare un documento de una gran base de datos con un párrafo seleccionado por su importancia, al que denominan "texto muestra". Una vez efectuada la comparación, los procesadores intercambian información y ordenan los documentos en función de su grado de concordancia con la muestra.

La comparación de dos fragmentos de prosa, para ver hasta qué punto concuerdan, no es tarea sencilla. El mero recuento del número de palabras de que constan las muestras carece de utilidad, porque el recuento está contaminado por artículos, conjunciones, etcétera, que apenas si tienen contenido de información específica. Por tal motivo, el sistema de recuperación de documentos recurre a un diccionario y a ciertas reglas gramaticales para extraer de cada muestra las frases que sí aportan contenidos específicos. Cada procesador se carga con un artículo distinto, comprimido del modo descrito; seguidamente, se hace llegar hasta todos los procesadores de la red la muestra objeto de búsqueda.

El proceso de comparación es bastante simple; y dado que se repasan de una sola vez 65.536 documentos, resulta posible examinar la base de datos entera casi instantáneamente. La operación de clasificar los documentos según su concordancia con la muestra reviste mayor dificultad, porque exige una compleja pauta de comunicaciones entre los procesadores. No obstante, gracias al funcionamiento en paralelo cabe realizarla en unos 50 milisegundos. A continuación, se le presentan al usuario del sistema algunos de los documentos que encabezan la clasificación; el usuario puede elegir de entre ellos una nueva muestra para su bús-



4. *N*-CUBO BOOLEANO: proporciona la topología de la red que enlaza los procesadores de la máquina de conexión. Los *n*-cubos booleanos son versiones generalizadas de un cubo ordinario. Se pueden construir tales cubos en muchas dimensiones, fundado cada uno de ellos en el cubo de dimensión inferior. Un punto puede considerarse como cubo de cero dimensiones, el "0-cubo". Al conectar dos puntos, se obtiene un segmento, o "1-cubo". Al conectar un par de "2-cubos" (cuadrados) resulta el cubo tridimensional ordinario. Uniendo dos cubos tridimensionales por sus vértices se forma un "4-cubo". La repetición del proceso produciría un "12-cubo" de 4096 vértices. Los 4096 microcircuitos están intercableados en la disposición de 12-cubo.



5. DIVERSAS RUTAS de comunicación entre microcircuitos, proporcionadas por un *n*-cubo. Aunque la ilustración muestra dos posibilidades en un cubo tridimensional, sirve el mismo principio para el 12-cubo de la máquina de conexión. A cada vértice del *n*-cubo (que es el emplazamiento de un microcircuito) se le puede asignar unívocamente una dirección, como sigue. Hay en un 3-cubo tres pares de planos. Cada plano puede designarse por 0 o por 1; a cada vértice se le asigna entonces una dirección de tres dígitos, según en qué miembro de cada par de planos se encuentre en (*1*). Los dispositivos de direccionamiento de que va provisto cada vértice se van pasando mensajes unos a otros, para lo cual leen la dirección y la procesan a razón de un dígito por vez. En el ejemplo de la ilustración se está enviando un mensaje desde 000 hasta 111. El dispositivo de direccionamiento lee el primer dígito y hace progresar el mensaje hasta el punto 100 (*2*). En él se lee el segundo dígito (*3*). En 110 se lee el tercer dígito, y se envía el mensaje a su destino (*4*). Puede suceder, no obstante, que en el momento de emitir el mensaje la línea de enlace entre 000 y 100 esté ocupada (*5*). En tal caso, el dispositivo de encaminamiento se limita a leer, primero, el segundo dígito de la dirección y elegir una ruta distinta (*6*). A continuación, se leen los dígitos primero y tercero (*7*, *8*) y el mensaje se entrega en la dirección correcta.

queda. (Recíprocamente, es factible elegir los artículos que sean irrelevantes como muestras de carácter negativo.) Puesto que todas las comparaciones se efectúan en el acto, es posible repasar repetidamente la colección completa de textos en un tiempo breve, lo que garantiza la localización de todos los artículos que vengan al caso.

El programa de localización de documentos funciona a pesar de que nada hay en él que se asemeje siquiera a la comprensión de los contenidos de los artículos. En realidad, la comprensión de tales contenidos exigiría un considerable acopio de conocimientos básicos relativos al mundo, conocimientos que no se han incorporado en el sistema de localización. Uno de los campos de investigación más apasionantes en lo que a la máquina de conexión concierne es la confección de programas que dispongan de tal información y consigan remedar ciertas facetas de la razón humana.

Lo mismo que al procesar imágenes bidimensionales para formar un modelo del mundo tridimensional, el cerebro humano efectúa, aparentemente sin el menor esfuerzo, razonamientos "de sentido común". Cualquier niño es capaz de deducir (con la respuesta afectiva apropiada) que, si lo suelta, el jarrón favorito de su madre caerá. El niño infiere que el jarrón se parece más a una bandeja o a una piedra, que caen al soltarlos, que a un pájaro o un globo, que no caen. El niño realiza correctamente la inferencia, aun cuando la información contenga elementos contradictorios, como, por ejemplo, que el jarrón sea redondo, lo mismo que un globo, o que su madre tenga también un pajarito.

Es obvio que en el caso de los humanos la facilidad y precisión de tales inferencias aumenta con la acumulación de conocimientos acerca del mundo. En el caso de las computadoras ordinarias ocurre exactamente lo contrario. Al crecer el número de distintos conceptos, la cifra de posibles relaciones entre ellos crece más de prisa todavía. Dado que un ordenador secuencial sólo puede examinar, cada vez, una de tales relaciones, al acrecentarse sus "conocimientos básicos" su marcha se hace espectacularmente más lenta. Lo cierto es que uno de los estímulos básicos que indujeron al diseño de la máquina de conexión fue la lentitud de los ordenadores tradicionales en las tareas de razonamiento "de sentido común".

A finales del decenio pasado, siendo quien escribe estudiante de segundo ciclo en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), me interesé por la posibilidad de la simulación informática de los que podríamos llamar "razonamientos de sentido común". Me pareció que una salida del atolladero en que se atascan los ordenadores tradicionales al pedirles que efectúen deducciones sencillas en asuntos de la vida ordinaria podría consistir en la construcción de una máquina capaz de examinar las posibles relaciones entre diversos conceptos a razón de más de una por vez. (Llegué a tal conclusión inspirado por los trabajos de Marvin L. Minsky, del MIT, y de Scott E. Fahlman, de la Universidad Carnegie-Mellon.) Sucedía esto en 1978. Hacia 1985 la idea habría alcanzado la fase de construcción de un verdadero prototipo, con una subvención de la U.S.

Defense Advanced Research Projects Agency, que se mostró dispuesta a adquirir la primera máquina. Por entonces había abandonado el MIT y había participado en la fundación de la compañía que fabrica y vende la máquina de conexión (Thinking Machines Corporation).

Ahora que la máquina de conexión es realidad tangible, los investigadores en inteligencia artificial se están valiendo de ella para resolver problemas de "sentido común". La idea germinal del método consiste en asignar una noción fundamental a cada procesador. La representación de las múltiples relaciones entre las nociones simples puede quedar plasmada luego en la red de conexiones entre los procesadores. En el sencillo ejemplo dado anteriormente, un procesador puede representar la noción de "jarrón", otro el de "mamá" y un tercero el de "le gusta". Serían las conexiones entre estos tres procesadores las que contuvieran el conocimiento de que "A mamá le gusta su jarrón". Otras conexiones podrían representar la forma, composición e historia del jarrón. A la hora de establecer cuáles serían las consecuencias de tirar el jarrón, se podrían explorar en paralelo las conexiones relevantes.

A tenor de como se están desarrollando las cosas –hay ya en funcionamiento alrededor de una docena de máquinas de conexión–, no cabe duda de que pronto serán muchos los programas nuevos para la máquina. Lo más probable es que muchos de ellos correspondan a los cuatro generales antes mencionados, a saber, procesamiento de imágenes, simulación de procesos físicos, exploración de bases de datos e inteligencia artificial. Una de las más desafiantes dificultades que aprender a usar la máquina de conexión comporta es la de "pensar en paralelo". Los programadores han acumulado bastante experiencia en la programación de máquinas secuenciales, y tal forma de programación ha llegado a convertirse casi en segunda naturaleza. Aprender a escribir programas para máquinas en paralelo exige pensar de formas muy diferentes de las requeridas por los ordenadores secuenciales.

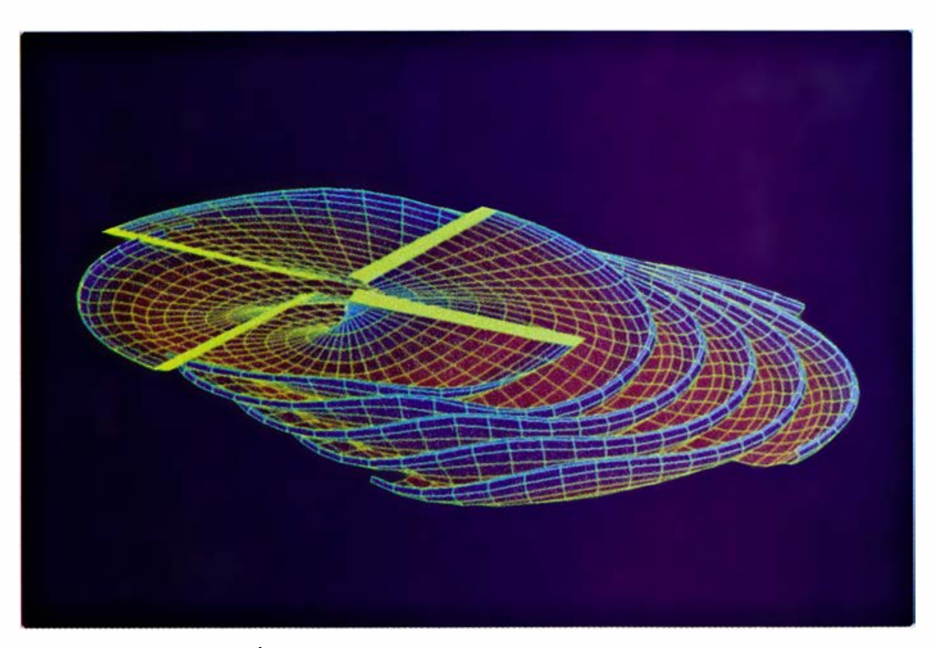
Reto que será mayor todavía en el caso de la máquina de conexión que para algunos otros tipos de máquinas en paralelo. No debe suponerse que sea la máquina de conexión la única representante de su género. A decir verdad, se encuentran actualmente en fase de realización otros muchos diseños "en paralelo". Generalizando, podría decirse que estos diseños pueden encuadrarse en dos clases muy amplias: diseños de "grano fino" y de "grano grueso". Las máquinas de grano grueso enlazan un número relativamente pequeño de procesadores, dotados cada uno de gran potencia computacional; las de grano fino interconectan una gran multitud de procesadores débiles.

Estas dos clases de computadoras en paralelo forman un espectro continuo. En un extremo tenemos el ordenador secuencial tradicional, que posee el número mínimo de procesadores: uno. En el extremo opuesto se encuentran diseños como la máquina de conexión, que contienen un número elevado de pequeños procesadores. A pesar de que algunos investigadores muy cualificados y compañías de importancia estén desarrollando el esquema de "grano grueso", soy de la opinión de que serán los diseños de grano fino los que en última instancia se demuestren más fecundos. Empero, son también los que más ajenos resultan a nuestra concepción tradicional de la programación de ordenadores.

Al redactar un programa para una máquina de grano grueso podemos adherirnos a nociones muy similares a las utilizadas en la programación de los ordenadores secuenciales; los problemas se presentan al coordinar los programas. Sin embargo, al escribir un programa para la máquina de conexión hemos de afrontar un tipo de problemas y posibilidades totalmente distinto. La explotación plena de todo el potencial de la máquina exigirá una nueva forma de concebir la programación, que nosotros, como programadores, acabamos de empezar a aprender. Tal proceso de aprendizaje será con seguridad tan gratificante y remunerador cuan dificultoso.

Algunas de las recompensas pueden ser consecuencia de que la máquina de conexión se amplíe y dote de potencia computacional considerablemente mayor sin someter su diseño a cambios fundamentales. Casi todas las aplicaciones que hoy contemplamos para la máquina de conexión podrían sacar buen provecho de ordenadores mucho mayores que las versiones actuales de la máquina de conexión. Por tal motivo, esta computadora se ha diseñado de suerte que admita un aumento importante del número de procesadores. La máquina de conexión puede ampliarse sin más que añadir procesadores, memoria y comunicaciones a una máquina existente.

Como caso límite de aumento de escala, imaginemos una computadora en paralelo provista de mil millones de procesadores. Tal máquina podría perfectamente incluir algunas de las características de la máquina de conexión, aunque aparecerían muchos problemas nuevos que resolver. De construirse con los recursos tecnológicos actuales, la máquina de mil millones de procesadores adquiriría las proporciones de un edificio y costaría 20 veces más que

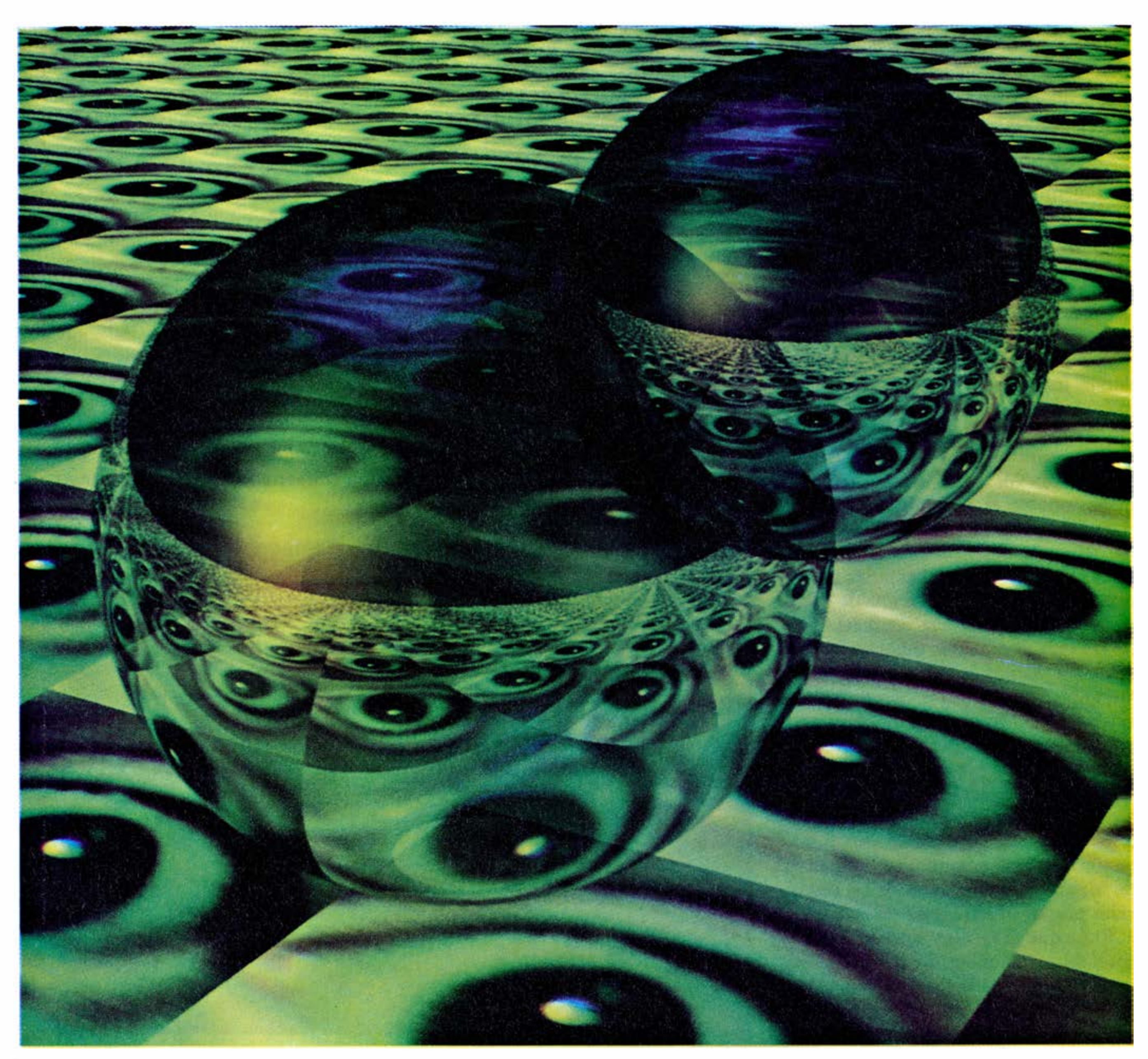


6. UN ROTOR DE HELICÓPTERO produce un flujo complejo de aire, fácil de simular en paralelo merced a la máquina de conexión. Cada procesador se encarga de computar un modelo de la circulación en el interior de cierta capa de aire (*pequeñas subdivisiones de la imagen*). La circulación del aire de cada sección influye en el aire de cada una de las demás secciones. Tales interacciones son computadas en paralelo. Los detalles como la pequeña distorsión ondulada de la parte baja revisten importancia para predecir las fuerzas ejercidas sobre la palas del helicóptero. La simulación fue preparada por T. Alan Egolf y por J. P. Massar.

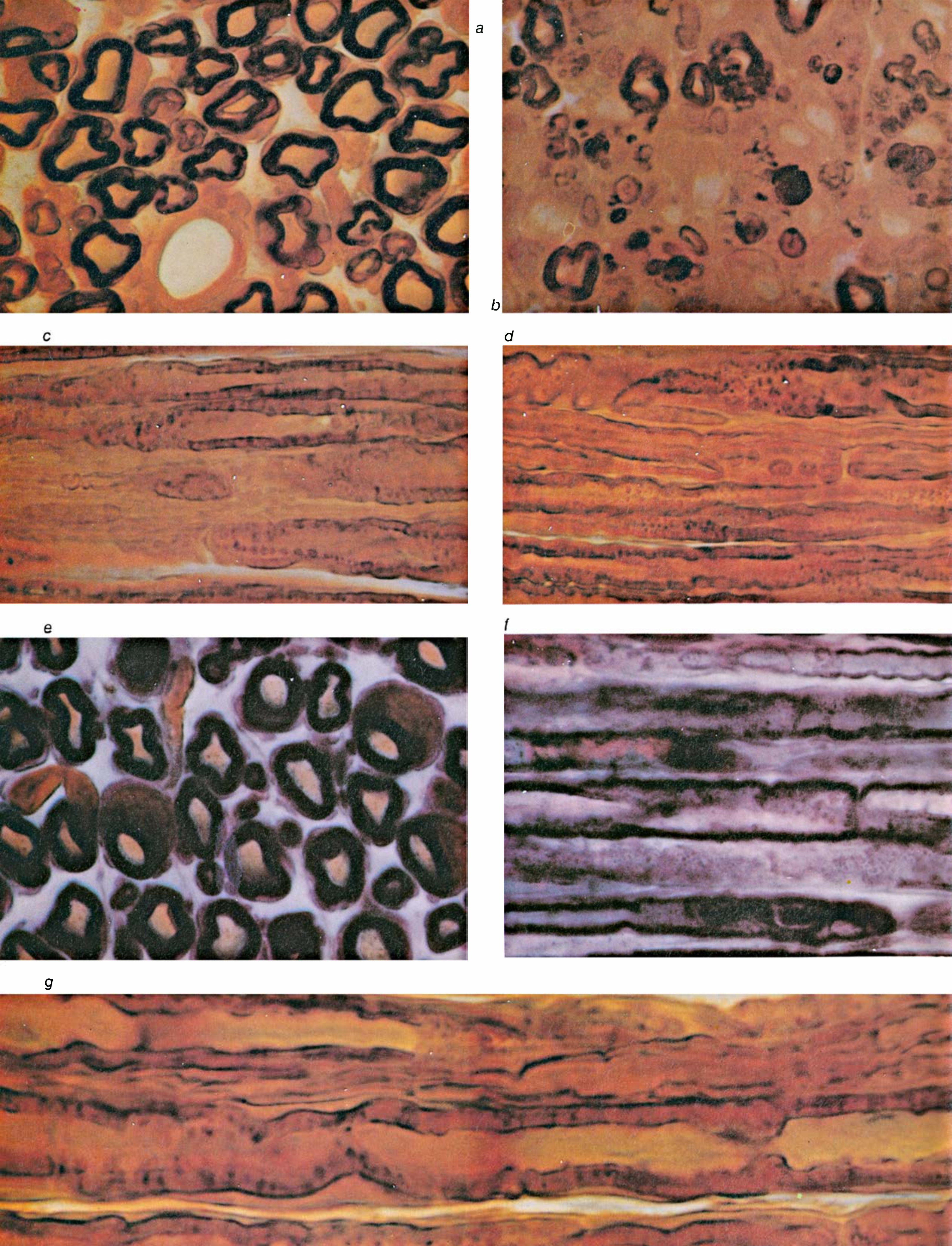
los mayores ordenadores conocidos. Sin embargo, podría ejecutar unos 100 billones (10^{14}) de instrucciones por segundo, lo cual es varios órdenes de magnitud mayor que la capacidad computacional conjunta de todos los superordenadores actuales.

La fabricación de un tal ingenio de cómputo plantea indiscutibles problemas técnicos, pero no irresolubles. El verdadero problema es de imaginación, el de concebir cómo utilizar tamaña capacidad computacional. Aunque hay problemas de ingeniería (entre ellos extrapolaciones de los ejemplos antes mencionados) que podrían beneficiarse de tal capacidad, se trata, en cierto sentido, de problemas triviales. Las aplicaciones dignas de un máquina provista de mil millones de procesadores habrían de entrañar un cambio radical en nuestro modo de concebir la computación.

Una computadora en paralelo provista de mil millones de procesadores serviría de base para un servicio público de cómputo, similar a los servicios de agua, gas o electricidad. Lo mismo que una central térmica genera electricidad que se transmite a los aparatos eléctricos domésticos, una enorme computadora en paralelo podría suministrar la potencia computacional necesaria para toda una ciudad de robots y terminales. Por su diseño, la máquina en paralelo permitiría a muchos usuarios reservar una minúscula porción de su capacidad de cómputo para resolver pequeños problemas, mientras que a los problemas grandes podría aplicarse la capacidad total. Tal visión es un tanto utópica (al menos por el momento), pero de ninguna forma impracticable, y ello nos hace pensar en la profundidad de los cambios que el procesamiento en paralelo puede en última instancia comportar.



7. ILUSTRACION POR ORDENADOR: he ahí uno de los campos donde mayores frutos pueden rendir los computadores en paralelo. Este gráfico se obtuvo con la técnica de seguimiento de rayos. Cada procesador de la máquina de conexión está asociado con un píxel (elemento de imagen) diferente. Los procesadores van determinando la trayectoria descrita por los rayos de luz al reflejarse en objetos imaginarios, que aquí son bolas de cristal e imágenes de ojos. Las trayectorias de los rayos determinan el color final que habrá de tener cada píxel. Karl Sims, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, creó la imagen.


a
b
c
d
e
f
g

La mielina

Corresponde a la mielina facilitar el proceso de conducción de impulsos. Cualquier alteración que sufra su estructura o su estabilidad perturbará el funcionamiento del sistema nervioso

Leonardo Mateu

Las células nerviosas, o neuronas, se caracterizan por poseer, entre otros rasgos distintivos, unas prolongaciones llamadas axones. Rodean a éstos unas capas densamente empaquetadas que forman un tejido especial: la mielina. Tan importante es esta estructura que todas las fibras nerviosas se dividen en amielínicas, si carecen de ella, o mielínicas, si la poseen.

Una de las primeras noticias de la misma la encontramos en un artículo publicado en 1854 por el patólogo alemán Rudolf Virchow, quien la bautizó así recurriendo al término griego *myelos*, que significa médula. Reflejaba con ello la abundancia de mielina que había observado en la parte interna o medular del cerebro. En 1878, Louis Antoine Ranvier, histólogo francés, sugería en sus *Lecciones sobre histología del sistema nervioso* que la mielina era un aislante eléctrico, análogo a la envoltura protectora de los cables telegráficos transoceánicos. En sus anotaciones, Ranvier dejó escrito que los nervios mielinizados presentaban unas formaciones equidistantes de igual longitud: las estrangulaciones anulares. Supuso que esas formaciones, conocidas hoy por nodos de Ranvier, desempeñaban una función puramente mecánica para prevenir que la mielina se deslizara por efecto de la gravedad. Experimentos de I. Tasaki y T. Takeuchi, en 1941, y de A. F. Huxley y R. Stampfli, en 1949, demostraron que los nodos de Ranvier eran, en realidad, los segmentos activos de la función nerviosa.

La membrana del axón mantiene una diferencia de potencial entre el interior celular y el medio externo mediante la concentración de iones potasio en el interior y extracción de iones sodio hacia el exterior. El impulso nervioso se produce porque, bajo ciertas condiciones, una proteína de la membrana, "el canal de sodio", y probablemente también algunos lípidos cambian transitoriamente su conformación, dejando pasar iones Na^+ masivamente hacia el citoplasma axonal; a ello le sigue una inmediata salida de iones K^+ hacia el espacio extracelular. Cuando eso ocurre, se produce un cambio en la diferencia de potencial, la cual se restablece en su condición original. En los axones no mielinizados el impulso nervioso se produce en forma local y transitoria en virtud del flujo de iones sodio y potasio aludido, flujo que genera una corriente eléctrica de entrada en la región perturbada y de salida en la superficie contigua de la membrana. Estas corrientes locales perturban, a su vez, la zona de membrana adyacente de una manera continua y secuencial, provocando que la señal eléctrica se propague ondulatoriamente a lo largo del eje axónico. Esta forma de propagación se conoce por conducción continua.

En los axones mielinizados asistimos a un proceso diferente: la zona de membrana expuesta al medio extracelular es la de los nodos de Ranvier, la llamada axolema nodal; el resto del axón está envuelto por la capa de mielina, caracterizada por una mayor resistencia eléctrica y escasa permeabilidad al medio extracelular. Si se perturba el axolema nodal, la corriente local que se genera en el nodo no puede fluir por la membrana adyacente ante la elevada resistencia eléctrica que encuentra, y salta hasta el nodo inmediato, para alterar allí la estructura del axolema. Vale decir, la excitación se desarrolla de nodo a nodo, confiriendo al proceso mayor rapidez y eficacia. Esta forma de propagación de impulsos, propuesta en 1925 por R. S. Lillie, se conoce por conducción saltatoria.

En los nervios amielínicos, el aumento de la velocidad de conducción está en relación directa con el cuadrado del diámetro de la fibra nerviosa. Por consiguiente, para que un nervio pueda duplicar su velocidad de conducción, debe aumentar cuatro veces su diámetro. En los nervios mielínicos, la velocidad de conducción aumenta con el diámetro del axón; en cuyo caso, para duplicar la velocidad de transmisión de impulsos, la fibra requiere aumentar su diámetro sólo dos veces. Esta propiedad confiere una notable ventaja a los nervios mielinizados: la disminución del volumen eficaz, que llega a ser de hasta unos dos órdenes de magnitud (unas 100 veces) menor que en los nervios amielínicos.

La mielina posee un altísimo contenido en lípidos, repartidos en las siguientes proporciones: 30 por ciento de colesterol, 40 por ciento de fosfolípidos y el 30 por ciento restante de glicolípidos. Entre los últimos, la especie más importante son los cerebrósidos. Aproximadamente un 10 por ciento de los glicolípidos está constituido por los sulfátidos.

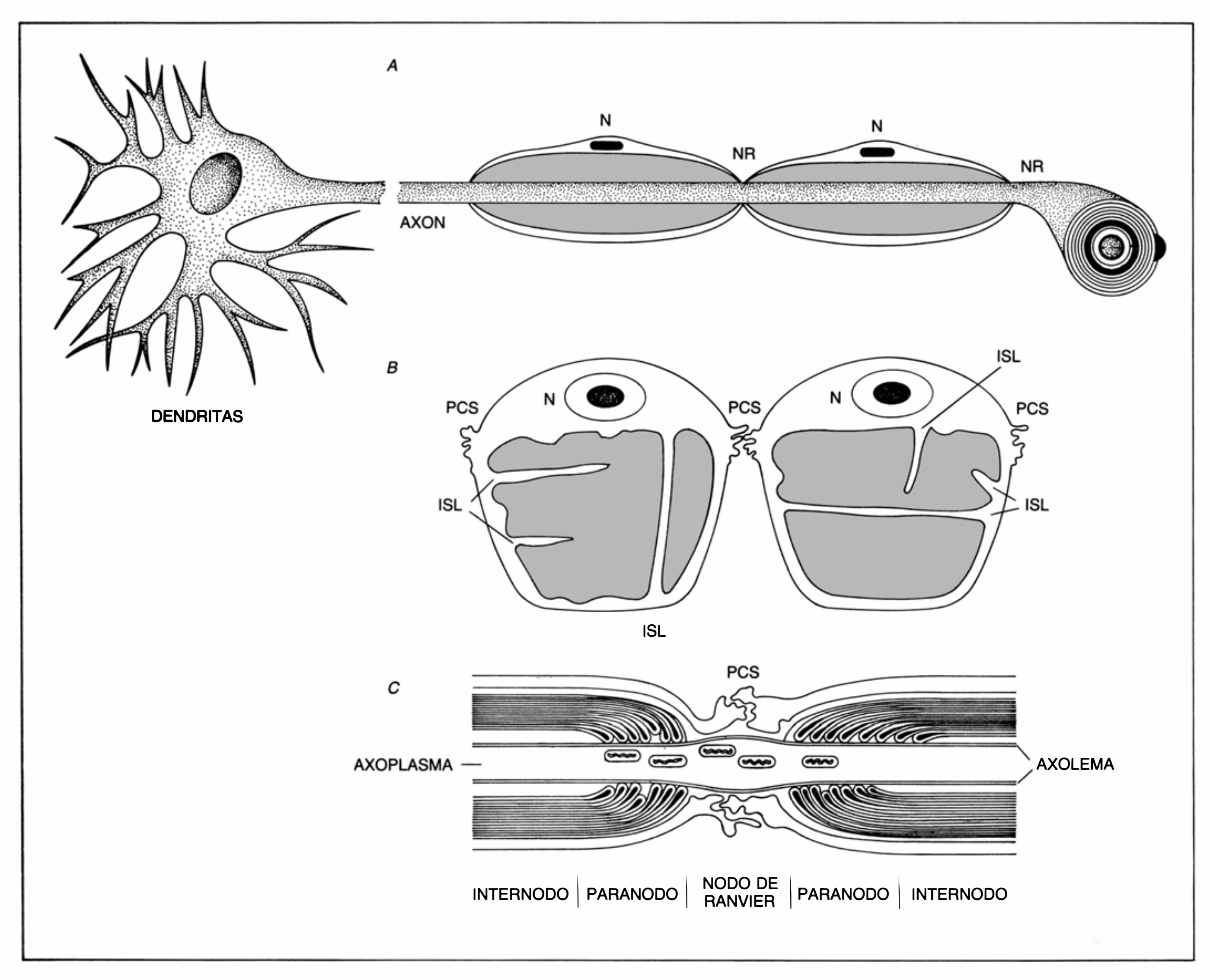
En el sistema nervioso central, la proteína básica A1, llamada así por su fácil extracción con soluciones ácidas, y el proteolípido de Folch-Lees, descubierto en los años cincuenta por el investigador español Jordi Folch-Pi y por Marjorie V. Lees, constituyen el 70 por ciento del contenido proteico total de

1. NERVIOS CIATICOS DE RATA, procesados originalmente para microscopía electrónica y teñidos con la técnica del nitrato de plata reducido de Cajal. De izquierda a derecha, y de arriba abajo: corte transversal de ciático de rata sana, en donde se observa gran cantidad de axones bien mielinizados; corte transversal de ciático de rata a la que se le indujo la neuritis alérgica experimental, y se encuentra en un estado avanzado de la enfermedad (sólo unos cuantos axones conservan la mielina); las dos siguientes y la última corresponden a cortes longitudinales de la preparación mostrada en segundo lugar, y en ellas se observan distintas zonas del nervio en diferentes estadios del proceso desmielinizante; por último, las dos restantes, de un color azulado, constituyen una modificación (virado al oro) realizada por V. Parthe del método de coloración inicial, para mostrar las células de Schwann que se ven coloreadas de una tonalidad intensa púrpura.

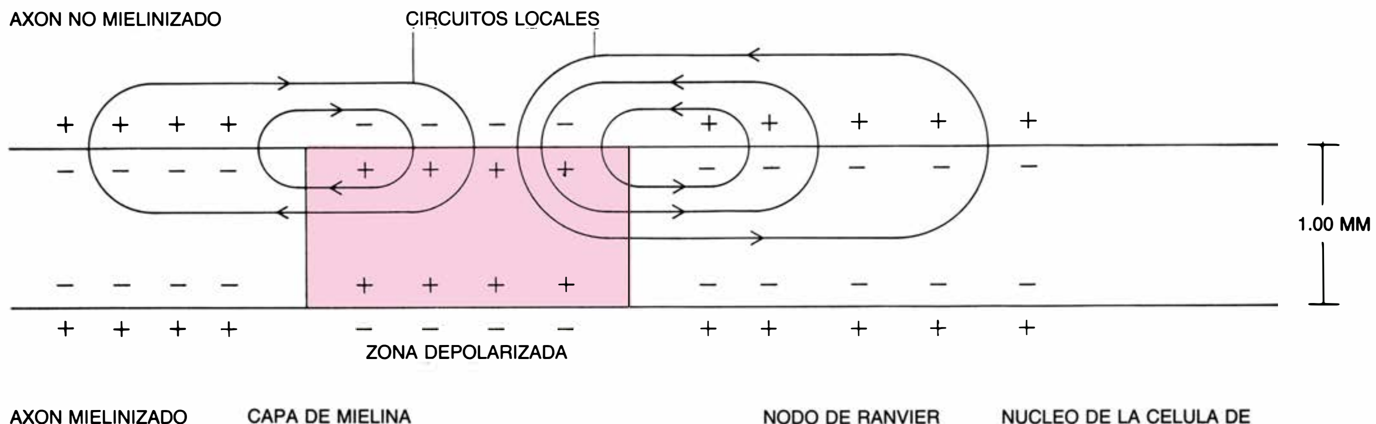
la mielina. También hay cantidades menores de otras proteínas, enzimas algunas de ellas; por ejemplo, la anhidrasa carbónica, que cataliza la interconversión del ácido carbónico y del dióxido de carbono. La presencia de enzimas sugiere que la mielina, además de aislante eléctrico, desempeña papeles más activos en la conducción del impulso nervioso. El sistema nervioso periférico contiene tres especies proteicas predominantes: la glicoproteína P0, la más abundante, constituye en torno al 50 por ciento del contenido total; la P1, que es la misma proteína básica A1 del sistema nervioso central, y la P2, una proteína básica característica del sistema nervioso periférico.

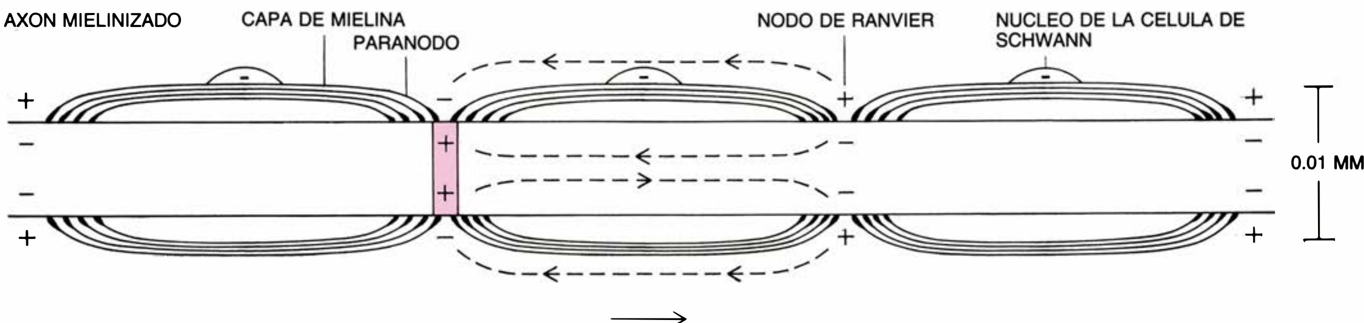
Los estudios de birrefringencia llevados a cabo por Ch. G. Ehrenberg en 1849 y por G. Valentin en 1861 condujeron a postular que la mielina poseía un alto grado de ordenamiento estructural. Hubo que esperar, sin embargo, a la aplicación de la técnica de difracción de rayos X para que F. O. Schmitt, R. S. Bear y G. L. Clark, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, propusieran, en 1935, un modelo molecular de mielina; consistía éste en una disposición periódica formada por una serie de dobles capas lipídicas concéntricas con láminas de proteínas intercaladas.

En 1949, F. S. Sjostrand, del Instituto Carolino de Estocolmo, observó la mielina con la técnica de microscopía electrónica, confirmando que estaba integrada por una disposición multilamelar, observación esta que sería corroborada un año más tarde por Humberto Fernández-Morán, fundador del Instituto Venezolano de Investigaciones Neurológicas y Cerebrales (IVNIC), del que se originaría el actual Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). En 1954, Betty Geren, de la Universidad de Harvard, demostró que la disposición multilamelar de la mielina no era concéntrica, sino espiral, y que las membranas que rodean al axón derivan directamente de las células gliales. El mecanismo de formación propuesto por Geren imponía condiciones de simetría a la estructura y determinaba que la unidad de re-



2. MIELINA DEL SISTEMA NERVIOSO PERIFERICO, esquematizada. Arriba se ilustra la neurona y un segmento de su axón, cubierto este por dos internodos, cada uno formado por el arrollamiento en espiral de una célula de Schwann, cuyo núcleo (N) se ubica en la periferia. La separación entre dos internodos deja la membrana axonal (axolema) expuesta al medio externo en el nodo de Ranvier (NR). En la sección transversal de un tercer internodo se observa una serie de círculos concéntricos que semejan la figura formada por las membranas de mielina. Las dos células de Schwann, desenrolladas y en forma plana (*centro*), muestran la mielina compacta (*zonas obscuras*) y los cordones de citoplasma intramielínico (*zonas claras*), que reciben el nombre de incisuras de Schmidt-Lanterman (ISL); se distinguen también las prolongaciones de la célula de Schwann (PSC), que protegen el NR. En *C* se esquematiza un nodo de Ranvier con las terminaciones de la mielina adosadas sobre el axolema, en la zona paranodal y algunas mitocondrias en el citoplasma del axón (axoplasma).





3. CONDUCCION DE UN POTENCIAL DE ACCION para un nervio amielínico (*arriba*) y para otro mielínico (*abajo*). En ambos nervios el impulso se manifiesta como una despolarización transitoria de la membrana del axón, producida por el cambio de permeabilidad al paso de los iones sodio, que entran en masa, seguido por una salida de iones potasio. En los nervios amielínicos el flujo iónico despolariza la zona de membrana vecina generando corrientes de acción (circuitos locales): la conducción se realiza de manera continua. En los nervios mielínicos, los flujos de iones se producen en los nodos de Ranvier, de manera que el impulso salta de un nodo a otro. Los signos (+ y −) representan cargas almacenadas en la membrana, al haber una diferencia de potencial entre el interior y el exterior. En ambos casos, las zonas despolarizadas durante el paso de un impulso nervioso se indican mediante un sombreado en ambos axones.

petición estaba constituida por un par de membranas unidas por sus superficies citoplasmáticas.

En 1971, D. L. D. Caspar y D. A. Kirschner, de la Universidad de Brandeis, lograron registrar los diagramas de difracción de rayos X de mielina a una resolución de 10 angstrom y propusieron un modelo molecular de su estructura concorde con su composición química. El perfil de densidad electrónica mostraba una asimetría en la región hidrocarbonada de la bicapa lipídica, asimetría que se asoció a una concentración de colesterol en el lado externo mayor que en el lado interno de la membrana. Pero esa asimetría admite otra interpretación: podría tratarse de una diferente distribución de proteínas en los dos lados de la bicapa.

Tener acceso al perfil de densidad electrónica a 10 angstrom significó un logro importante; era la primera vez que se conocía la estructura de una membrana biológica a tan alta resolución. Sin embargo, esa información estructural no aportó nada nuevo sobre el funcionamiento de la mielina. En vista de ello, en el laboratorio de V. Luzzati, en Gif-sur-Yvette, donde yo trabajaba en esa época, empezamos a pensar en qué experimentos habría que realizar para recabar información no solamente de la estructura, sino también de su relación con la función. Una posibilidad era intentar obtener patrones de difracción de rayos X a una resolución superior a los 10 angstrom, pero no se garantizaba con ello que obtendríamos la información necesaria para dilucidar otros aspectos de la función que desempeñaba la mielina. Decidimos, entonces, intentar otra vía en la que se hacía especial hincapié en las interacciones entre los componentes moleculares y sus tipos de ensamblaje.

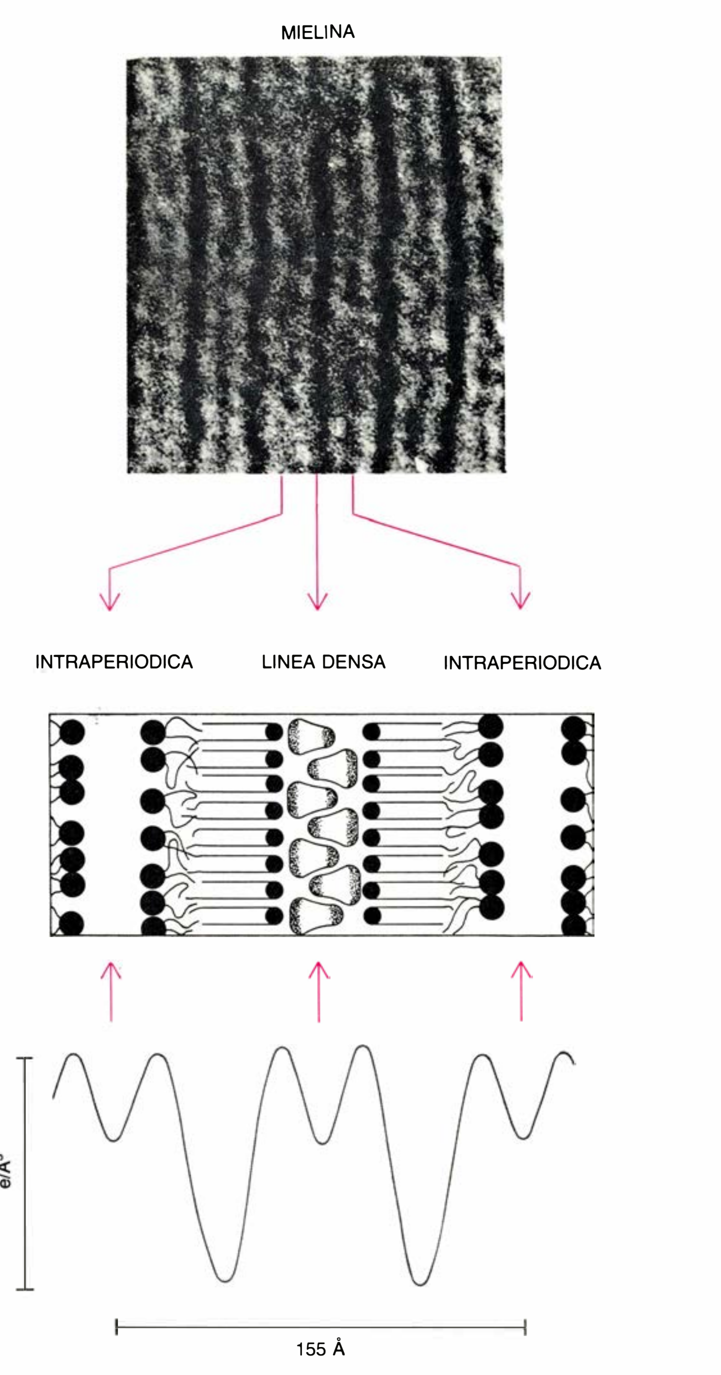
Iniciamos los experimentos de recombinación de componentes de mielina a principios de 1971, en colaboración con el laboratorio de L. L. M. van Deenen, de la Universidad de Utrecht, en donde se habían aislado y purificado cantidades importantes de proteínas básicas de mielina del sistema nervioso central, las A1, y del sistema nervioso periférico, las P2. En concreto, trabajaron con nosotros Y. London, quien moriría más tarde en los altos del Golán, y R. M. Gould, hoy en el Instituto de Investigación sobre Retraso Mental, de Nueva York.

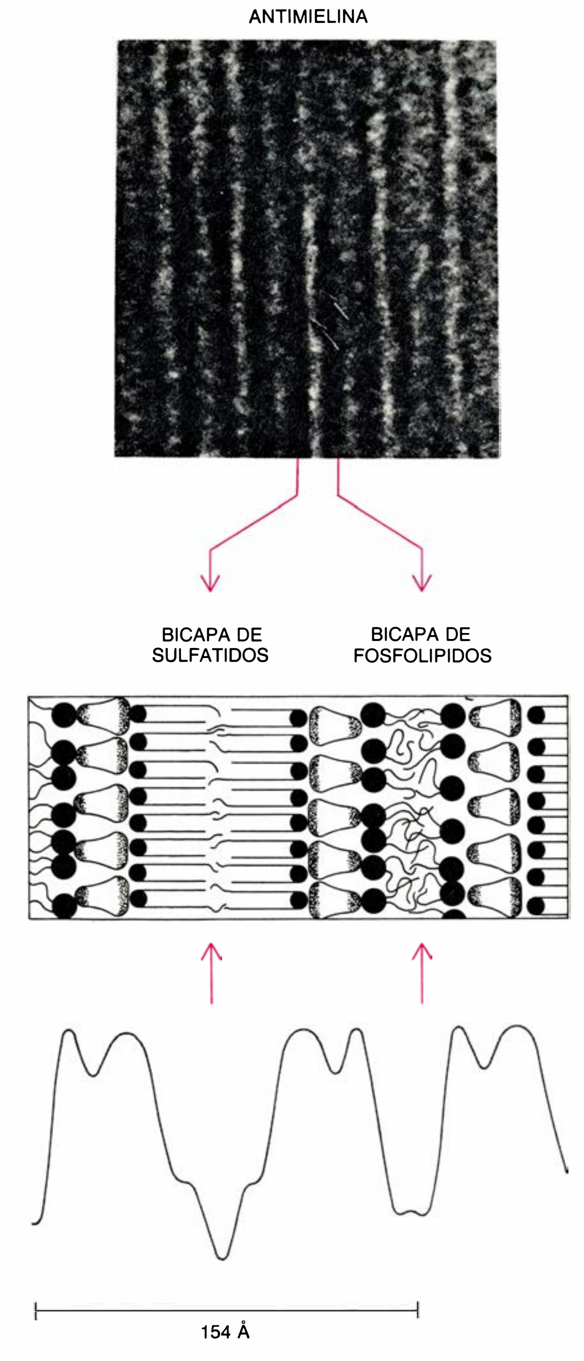
Formamos los sistemas ternarios lípido-proteína-agua añadiendo lentamente suspensiones de vesículas lipídicas, preparadas con distintas clases de lípidos extraídos de mielina, en soluciones de una de las dos proteínas, A1 o P2. Con las vesículas que contenían la fracción de lípidos ácidos se produjo una recombinación, a la que dimos el nombre de fase compleja, cuya estructura estudiamos por difracción de rayos X y microscopía electrónica. Para sorpresa nuestra, a pesar de su sencillez química, el material recombinado presentaba características estructurales semejantes a las de la mielina: su estructura era periódica en una dimensión, la unidad de repetición contenía dos bicapas lipídicas y, por último, las dimensiones reticulares de 154 angstrom y 175 angstrom, para las fases formadas con proteínas A1 y P2, respectivamente, eran muy similares a las de la mielina nativa. En efecto, según la especie animal el retículo de la vaina de mielina nativa mide de 150 a 160 angstrom en el sistema nervioso central y de 170 a 180 angstrom en el sistema nervioso periférico. No obstante esas semejanzas estructurales tan notables, los principios de construcción de la fase compleja y de la mielina nativa eran diferentes, ya que en el sistema modelo la celda unitaria contenía

dos bicapas lipídicas simétricas y diferentes, mientras que la mielina está formada por dos bicapas asimétricas e iguales.

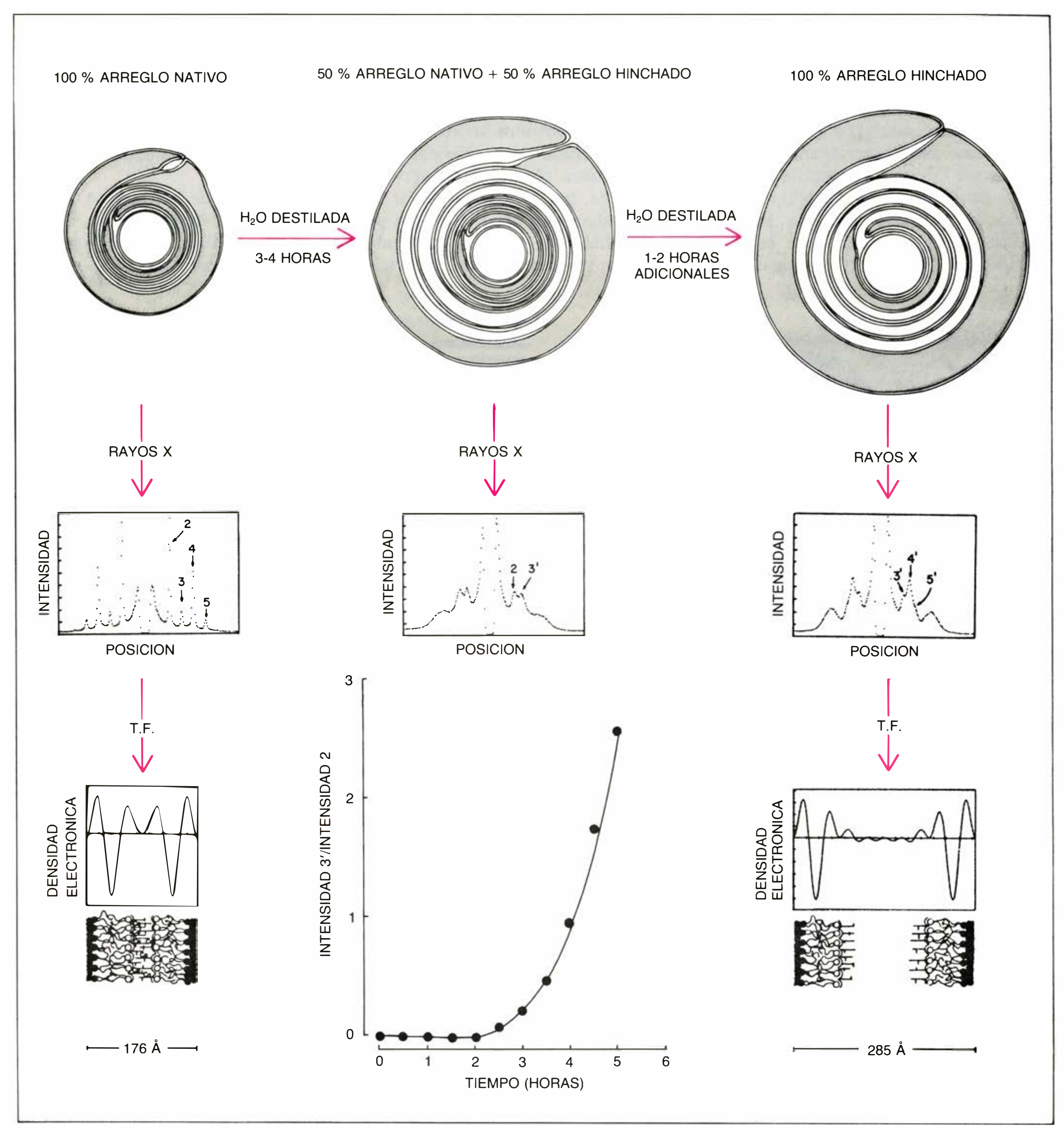
Al calcular el perfil de densidad electrónica de la fase compleja a partir de los patrones de difracción de rayos X, se hizo evidente que las dos bicapas de lípidos poseían distinto grosor: la más ancha (de unos 70 angstrom) la asociamos con la presencia de los sulfátidos por tener esas moléculas las cadenas hidrocarbonadas más largas y, la más delgada (de unos 40 angstrom), debía contener los fosfolípidos. Añadíase a ello la protuberancia que se observaba asociada a la bicapa de sulfátidos, indicadora de un estrecho contacto entre esa clase de lípidos y la proteína básica. Entendimos que ese contacto debíase a una afinidad específica entre ambas especies moleculares.

Mientras llevábamos a cabo los estudios de reconstrucción de mielina a partir de sus componentes, André Gabriel e Yves Dupont, del Centro de Estudios Nucleares de Grenoble, construyeron el primer detector sensible de posición para rayos X, que permitía rebajar hasta mil veces el tiempo de exposición de las muestras a la radiación. Los primeros diagramas rápidos registrados con ese instrumento usando generadores convencionales de radiación los hicimos, en el laboratorio de Luz-





4. COMPARACION ESTRUCTURAL DE LA MIELINA y la fase compleja que se forma espontáneamente al mezclar algunos componentes suyos (proteínas básicas y lípidos ácidos). La micrografía electrónica de la mielina manifiesta una alternancia de intensidad entre las líneas oscuras electrodensas, que se asocian a los grupos polares de la zona extracelular (*línea intraperiódica*) y la zona citoplasmática (*línea densa*). En la fase compleja, que por razones de simetría hemos llamado antimielina, la alternancia de intensidad se observa entre las líneas claras, asociadas a las cadenas parafínicas de la bicapa lipídica. Los principios estructurales básicos de la mielina y la antimielina se muestran en la parte central; se señalan las posiciones de los centros de simetría (*flechas*). En la mielina, la unidad estructural contiene dos membranas iguales asimétricas, mientras que la antimielina está formada por dos bicapas diferentes y simétricas. Los perfiles de densidad electrónica de ambas estructuras (electrones por angstrom cúbico) derivan de los patrones de difracción de rayos X que se han obtenido.



5. EVALUACION DE LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL de la mielina. Se ilustra un corte esquemático de un axón periférico, con el 100 por ciento de su mielina en arreglo nativo y a 176 angstrom de repetición. Esa estructura da origen a un patrón de difracción de rayos X caracterizado por un conjunto único de reflexiones , de cuyo análisis se deriva, por transformación de Fourier (*TF*), el perfil de densidad electrónica y el modelo correspondiente (*columna de la izquierda*). Al incubar el nervio nativo en soluciones de baja fuerza iónica, se va introduciendo lentamente una lámina de líquido por la línea intraperiódica, produciendo un nuevo estado de equilibrio de las membranas que rodean al axón. Este nuevo arreglo estará caracterizado por un patrón de rayos X diferente. La columna central muestra un corte esquemático de axón, que presenta el 50 por ciento de la mielina hinchada, y, a 285 angstrom de repetición, el patrón de rayos X está formado por dos conjuntos de reflexiones correspondientes a los dos estados presentes: nativo e hinchado (*columna central*). En el caso de un axòn con el 100 por ciento de la mielina hinchada, vuelve a registrarse un conjunto único de reflexiones, a partir del cual se puede calcular el perfil de densidad electrónica de la unidad repetitiva hinchada. La distancia entre bicapas es mayor debido a la lámina de agua intercalada entre las mismas (*columna de la derecha*).

zati en Gif-sur-Yvette, en sólo unos segundos. Pero, ¿qué fenómeno dinámico podría estudiarse en la mielina, cuyo curso temporal fuese compatible con la velocidad de respuesta del nuevo sistema de detección?

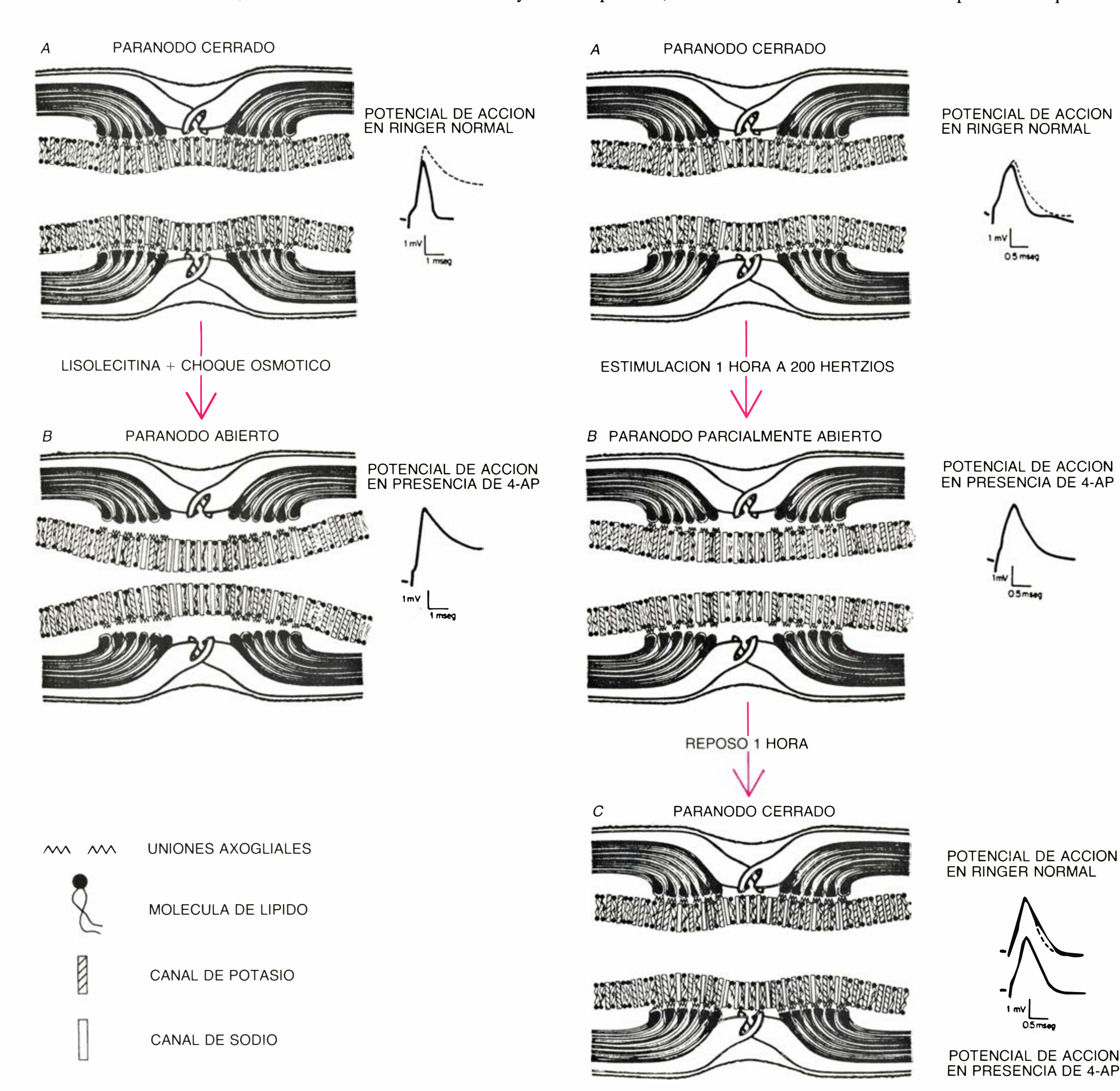
En 1957, J. D. Robertson, del Colegio Universitario de Londres, mediante microscopía electrónica, y más tarde, en 1969, C. R. Worthington y A. E. Blaurock, de la Universidad de Michigan, con difracción de rayos X, habían encontrado que, al sumergir los nervios periféricos en soluciones de composición distinta de la del líquido fisiológico, la distancia entre las membranas de mielina se modificaba apreciablemente. En este sentido, la mielina de nervio ciático de rata, cuyo período era de unos 170 angstrom en condiciones normales, aumentaba hasta

258 angstrom al sumergir dicho nervio ciático en una solución de baja fuerza iónica.

Este fenómeno de hinchamiento permitía cuestionarse sobre la estructura y función del sistema: ¿por qué la mielina de una dada especie animal, en condiciones fisiológicas normales, presenta siempre el mismo período de repetición? ¿por qué en el edema, la degeneración walleriana y otras enfermedades del sistema nervioso suele aumentar la distancia de separación entre las membranas?

En el laboratorio de Estructura Molecular del IVIC decidimos acometer los experimentos sobre la estabilidad estructural de la mielina. Allí diseñamos una cámara portanervios que permitía, por un lado, cambiar la solución salina que baña el nervio y, por otro, hacer la adquisición, simultáneamente y en tiempo real, de la señal de difracción de rayos X producida por la mielina. Con esa cámara lográbamos retirar o añadir a voluntad iones de la solución de perfusión y ver inmediatamente qué efecto se producía en la estructura de las membranas de mielina, en su empaquetamiento y en su estabilidad.

El proceso de separación de las membranas, el hinchamiento, se producía con rapidez o lentitud de acuerdo con el tratamiento previo al que so-



6. "APERTURA PARANODAL" por incubación (*izquierda*) y por estimulación nerviosa (*derecha*). Cuando un nervio recién disecado se trata con una molécula que tenga actividad de detergente suave, la lisolecitina en el ejemplo esquematizado, se produce un cambio importante en su actividad fisiológica; aquí, la duración del potencial de acción compuesto (PAC) aumenta en presencia de 4-aminopiridina (4-AP), que es un bloqueador de canales de potasio. El detergente "abre" el paranodo, exponiendo los canales de potasio al medio externo, haciéndolos accesibles a la acción de la 4-AP; ésta los bloquea, impidiendo que intervengan en la fase de repolarización del potencial, con el consiguiente incremento de la duración de la actividad eléctrica. En el caso de estimulación nerviosa, se observa un aumento del PAC en presencia de A-AP, aunque menor que en el caso de la lisolecitina. En situación de estimulacion nerviosa, la "apertura" parcial es reversible al dejar el nervio en reposo. Las dimensiones de algunas estructuras y la magnitud de las "aperturas" se han exagerado.

metíamos a los nervios. Si cambiábamos la solución de Ringer normal por agua destilada, el proceso se desarrollaba de una manera discreta y lenta, sustituyéndose paulatinamente el retículo original de 175 angstrom por un nuevo retículo correspondiente a un estado hinchado de unos 250 angstrom. Pero si antes del tratamiento con agua destilada bañábamos el nervio durante una hora con la misma solución de Ringer normal a la cual le habíamos eliminado el calcio y el magnesio, el hinchamiento ocurría con mucha mayor rapidez. En nuestra opinión, los iones divalentes (calcio y magnesio) resultaban fundamentales para estabilizar las interacciones en el dominio de las superficies de las membranas adyacentes. A esos iones les correspondería la misión de formar "puentes", que unirían cargas negativas de las membranas opuestas. Además, estabilizarían los contactos especializados de las uniones paranodales y axogliales.

Considerada la importancia del calcio y el magnesio para mantener la estabilidad de la mielina, y dado que la actividad fisiológica de generación y propagación de impulsos nerviosos involucra grandes movimientos iónicos, comenzamos a pensar en realizar experimentos de difracción dinámica de rayos X en condiciones de estimulación eléctrica de los nervios. Demostrado que la disminución de iones divalentes desestabilizaba la estructura de la mielina, nuestra hipótesis era que la actividad fisológica que producía flujos iónicos considerables podría inducir cambios en la disposición de las membranas o en su estabilidad estructural.

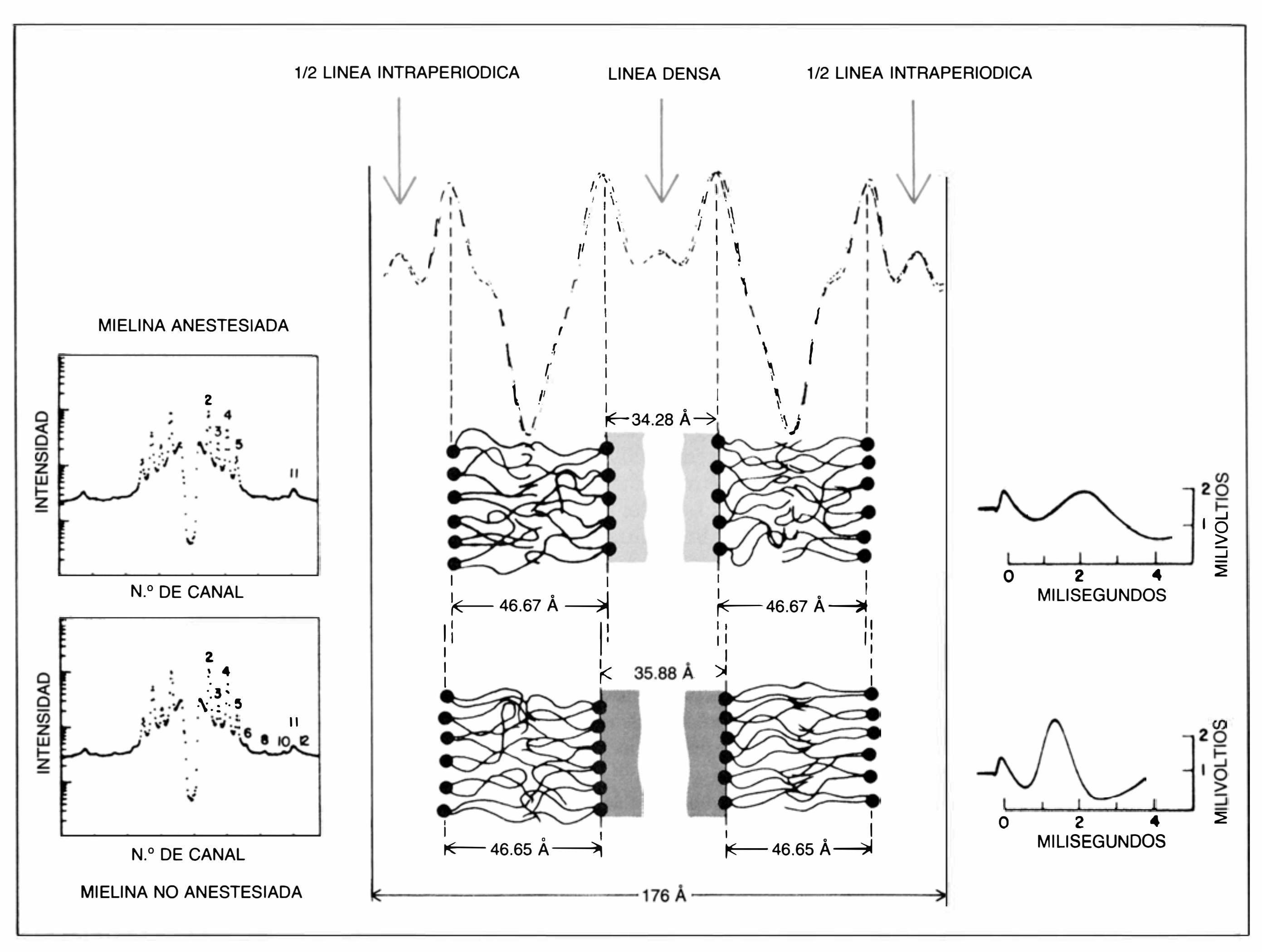
Determinamos, en primer lugar, las condiciones de intensidad y duración de los estímulos para que muchos axones fuesen activados al mismo tiempo y a alta frecuencia, al objeto de lograr que gran número de ellos estuviese excitado simultáneamente durante una fracción significativa del tiempo de adquisición de los patrones de difracción de rayos X. No nos acompañó la suerte: observamos pequeños cambios en los patrones de rayos X de la mielina de nervios excitados, pero sin ninguna significación estadística. Pero cuando sumergimos los nervios reiteradamente estimulados en soluciones de baja fuerza iónica, para ver cuál era la estabilidad estructural de su mielina, encontramos que el proceso de hinchamiento ocurría deprisa y con una cinética similiar a la de los nervios pretratados con las soluciones sin calcio y sin magnesio. Habíamos puesto de manifiesto, así, que la estabilidad estructural de la mielina se alteraba por la función fisiológica de transmitir impulsos nerviosos y también por la remoción de los iones divalentes. Nuestra primera interpretación del cambio de la estabilidad estructural durante la actividad nerviosa fue que este fenómeno se debía a que la distribución iónica intramielínica habíase modificado con la propagación de los impulsos. Pero, ¿dónde estaba localizada la estructura y cuál era el mecanismo responsable de la pérdida de la estabilidad? Una posibilidad era que la corriente producida durante la generación del potencial de acción pudiera modificar la concentración de iones divalentes (calcio y magnesio) en la línea intraperiódica, desestabilizando los "puentes" ya mencionados. Otra posibilidad era que la zona paranodal, adyacente al nodo de Ranvier, modificase también su estructura durante la generación del impulso, aumentando la permeabilidad de las uniones axogliales y paranodales, y, consecuentemente, facilitando la penetración de la solución de baja fuerza iónica, en la cual está inmerso el nervio, hacia el interior de la mielina. Pudimos abordar este problema apoyándonos en los hallazgos de M. Richtie, de la Universidad de Yale, quien, usando técnicas electrofisiológicas, había demostrado que en los nervios mielinizados los canales de sodio se encuentran concentrados en el nodo de Ranvier, mientras que los de potasio se localizan en la zona paranodal e internodal, cubiertos por la mielina, por cuyo motivo no contribuyen, pues, a la señal eléctrica del potencial.

Mi idea era que, si la desestabilización de la estructura de la mielina internodal, puesta en evidencia mediante la técnica de difracción dinámica de rayos X, subsecuentemente a la propagación de impulsos nerviosos, se debía a la "apertura" de las uniones axogliales, podíase detectar la presencia de los canales de potasio en un nervio estimulado repetidamente por la forma de la señal eléctrica. Hechos los experimentos, descubrimos que, en efecto, las prolongaciones de la mielina, que en condiciones de reposo están muy estrechamente adosadas al axolema paranodal, se separan al estimular el nervio, exponiendo al medio externo la membrana axonal, que se halla cubierta en condiciones de reposo. Dicho fenómeno de "apertura" es reversible y, en mi opinión, podría formar parte de un mecanismo de recambio para permitir al nervio la renovación del contenido iónico del espacio periaxonal, que se desajusta por las altas frecuencias de conducción de impulsos.

Una de las recientes teorías de la anestesia, la llamada "tensión-grosor", postula que, cuando los nervios son anestesiados con *n*-alcanos, estas moléculas, muy apolares, tienden a ubicarse en la región hidrocarbonada de las membranas excitables aumentando su grosor, lo que resulta en la desestabilización de los canales iónicos responsables de la generación del potencial de acción. En nuestro laboratorio pensamos que si dicha teoría era cierta, el engrosamiento postulado para las membranas excitables, también debería producirse en las membranas de la mielina. Con esa idea *in mente*, diseñamos una serie de experimentos que consistían en montar un nervio ciático de rana en el portamuestras dotado con el sistema de estimulación y registro del potencial de acción, bañándolo con una solución de Ringer normal, saturada previamente con *n*-pentano. Cada 150 segundos registrábamos, simultáneamente, el patrón de difracción de rayos X de la mielina y la actividad eléctrica del nervio.

Hecho esto, observamos que algunas de las señales características del espectro se modificaban continuamente a medida que el tamaño del potencial de acción disminuía por efecto de la anestesia: la estructura de la mielina estaba cambiando de manera continua. ¿Podrían estos cambios estructurales darnos información sobre el proceso que estaba ocurriendo en el axolema? Uno de los primeros pasos en esa dirección fue investigar si el fenómeno que estábamos observando era un artefacto no fisiológico. Para ello desarrollamos un montaje experimental que registrara patrones de difracción de rayos X de la mielina de nervios ciáticos de rana *in vivo*, con el cual se mantenía intacta la microcirculación sanguínea del animal. Conectamos ese dispositivo a un dispensador de vapores de pentano, pudiendo registrar los diagramas de difracción de rayos X *in vivo* y en tiempo real, mientras la rana se iba anestesiando por inhalación. El cambio estructural observado originalmente con nervios aislados tenía sentido fisiológico, puesto que también se producía *in vivo*, y además era reversible.

Para registrar los patrones de rayos X a la mayor resolución posible, decidimos continuar los experimentos con nervios aislados de ranas que habían



7. MODIFICACION DE LAS INTERACCIONES ENTRE MEMBRANAS con la anestesia del organismo *in vivo*. El patrón de difracción de rayos X de la mielina anestesiada (*arriba y a la izquierda*) destaca la ausencia de reflexiones de orden par. Cuando ese mismo nervio se recupera del efecto anestésico, en el patrón de rayos X (*abajo y a la izquierda*) vuelven a aparecer las reflexiones pares. Los perfiles de densidad electrónica calculados a partir de esos patrones (*centro de la figura*) muestran que las membranas de mielina anestesiada están desplazadas hacia la parte citoplasmática, haciendo que la línea densa disminuya su grosor en 1,6 angstrom. Los sombreados de diferente tonalidad en la línea densa quieren manifestar que el potencial electrostático de superficie de las membranas disminuye en condiciones de anestesia. A la derecha se muestran los PAC registrados en el mismo nervio, anestesiado (*arriba*) y recuperado (*abajo*).

sido anestesiadas *in vivo*, ya que así evitábamos el movimiento del animal vivo en el banco de difracción. El experimento en cuestión consistía en anestesiar la rana en una campana de vidrio conectada a un dispensador de *n*-pentano. Se aislaba luego el nervio ciático y se montaba en la cámara portanervios provista del sistema de irrigación y registro eléctrico para tomar las medidas estructurales y de actividad fisiológica. Ello nos permitía estudiar el efecto anestésico, en la estructura y la función, a través de la reversibilidad del proceso.

La señal eléctrica producida por el nervio nos indicó que la función estaba alterada: el tamaño del potencial de acción y la velocidad de conducción habían disminuido hasta un 30 por ciento de los valores típicos registrados en nervios no anestesiados. Por su parte, el patrón de difracción de rayos X obtenido a 14 angstrom de resolución difería significativamente del registrado en los nervios control; se producía un aumento de las reflexiones de orden impar y una disminución de las reflexiones de orden par.

Comparamos, luego, la estructura de la membrana de mielina de un nervio anestesiado y después de haberse recuperado. Para ello, derivamos los perfiles de densidad electrónica del mismo nervio en esos dos estados, a partir de los correspondientes patrones de difracción de rayos X. Mostraron los perfiles que, por efecto de la anestesia, se producía un acercamiento hacia la región citoplasmática de las dos membranas vecinas constituyentes de la unidad repetitiva de la mielina. En ese acercamiento, el grosor de la línea densa disminuía en 1,6 angstrom. Ese movimiento interno de las membranas, continuo, reversible y asociado al proceso de anestesia, no implicaba cambios en la estructura de la membrana. Concluimos, pues, que el efecto de la anestesia por *n*-pentano en la mielina se localizaría en las interacciones entre membranas adyacentes.

Estos resultados experimentales obtenidos por primera vez en un sistema *in vivo* coincidían con la teoría de Eyring, quien varios años antes había propuesto que los anestésicos ejercerían su acción interviniendo en las regiones hidrofóbicas de las proteínas de membrana, interacción que modificaba la conformación de esas moléculas. Dicho cambio comportaría el establecimiento de puentes salinos en la interfase membrana-agua, con la neutralización de cargas en la superficie.

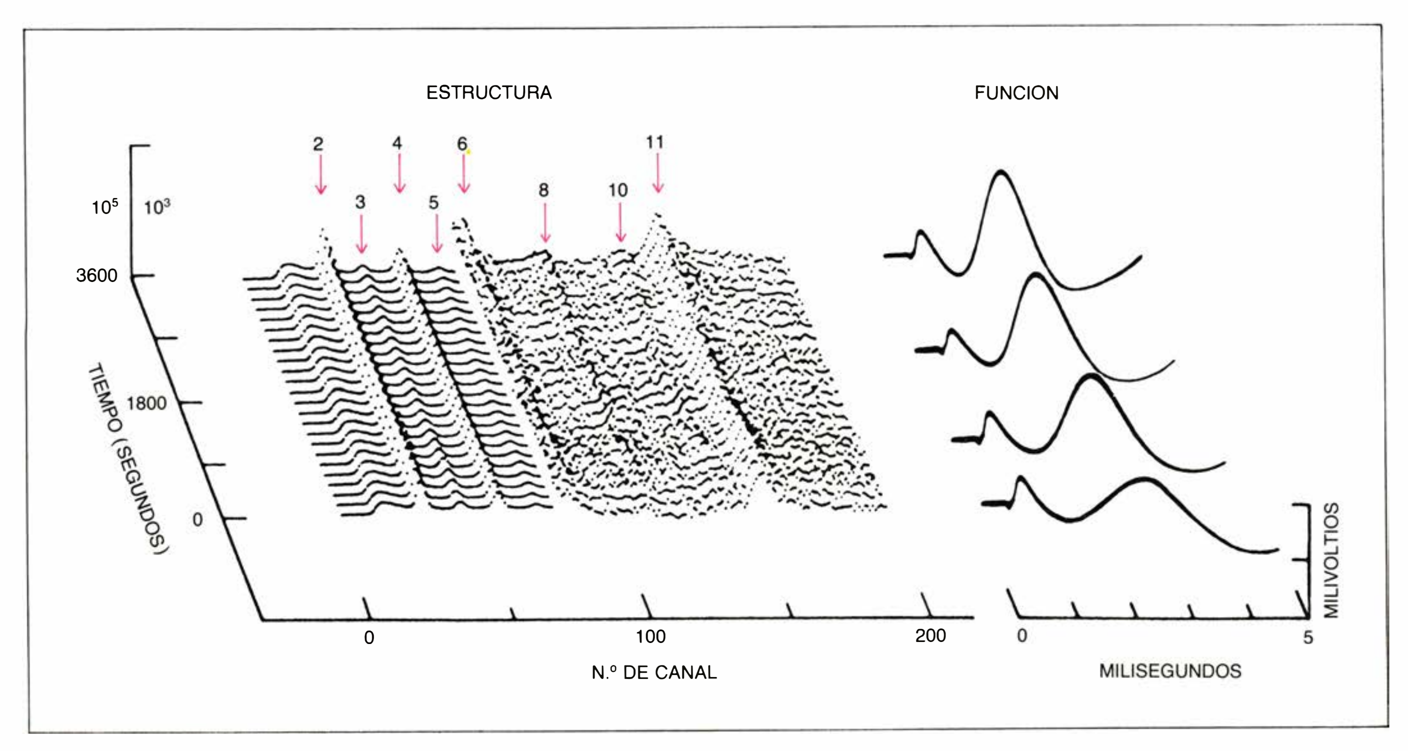
Y en efecto, el acercamiento de 1,6 angstrom observado en las membranas de mielina vecinas durante el proceso

de anestesia resultaba compatible con la disminución de una de las fuerzas que intrínsecamente tienden a separar las membranas: las fuerzas eléctricas repulsivas. De todo ello podría inferirse que, en el axolema, donde se genera el potencial de acción, se produce también una disminución en el potencial electrostático de la superficie de la membrana debido a la interacción entre el anestésico y los sitios hidrofóbicos de las proteínas, con la consiguiente desestabilización de los canales iónicos que dependen de la distribución de cargas en la superficie de la membrana. Desestabilización que impediría la entrada masiva de iones sodio hacia el citoplasma y bloquearía, así, la generación de potenciales de acción.

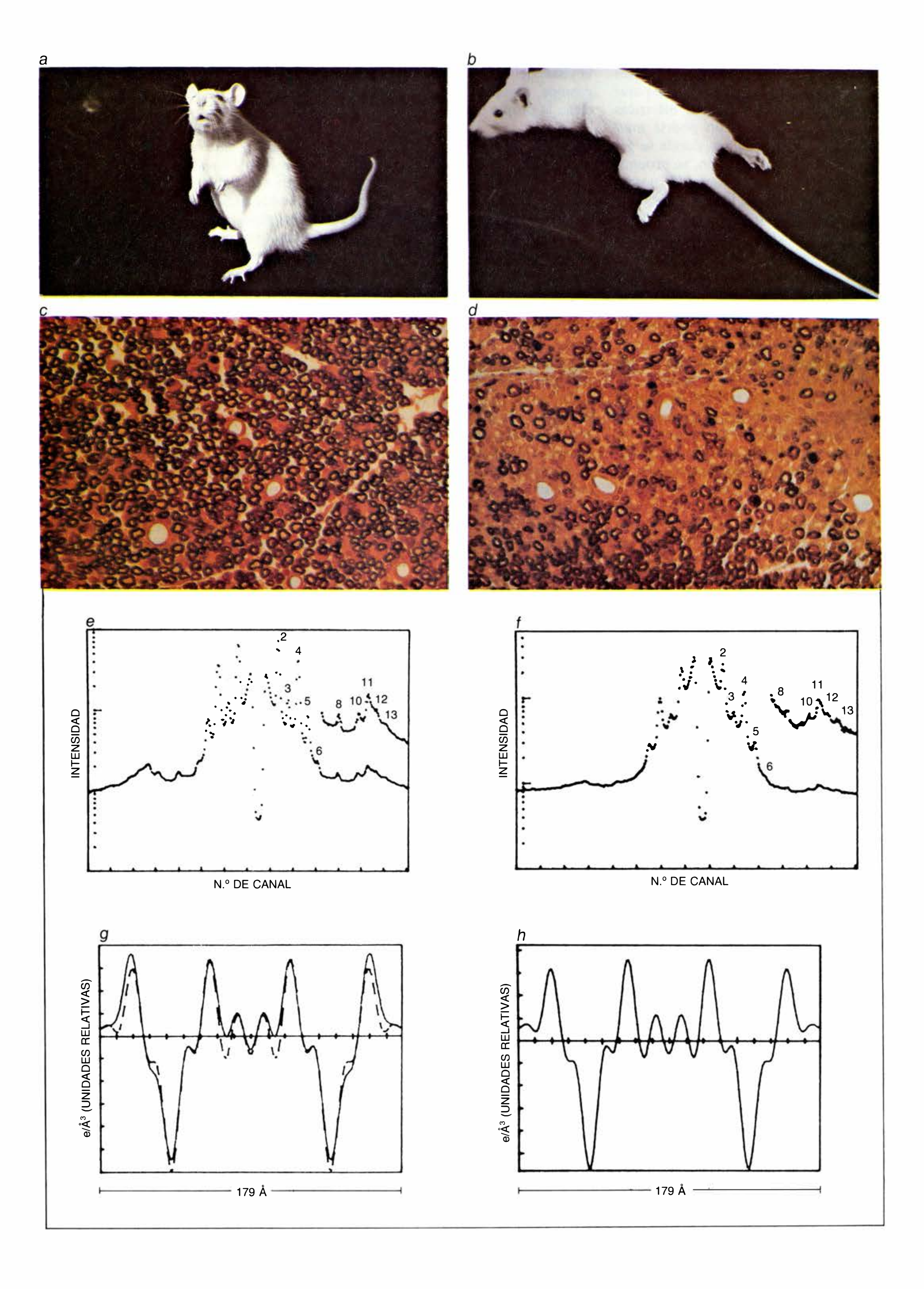
Corresponde a la mielina facilitar el proceso de conducción de impulsos. Por tanto, cualquier alteración de su estructura o estabilidad estructural tendrá consecuencias importantes en el funcionamiento del sistema nervioso. Uno de los ejemplos más claros de estrecha relación entre estructura y función de la mielina lo tenemos en la *esclerosis múltiple*, una de las enfermedades más frecuentes del sistema nervioso. Se caracteriza por presentar placas escleróticas en el sistema nervioso central en zonas que han perdido la mielina; según el grado de gravedad, produce pérdida de coordinación motora, debilidad muscular, trastornos de la vista, del lenguaje y la deglución, espasmos, parálisis, invalidez total e incluso la propia muerte.

La patología equivalente en el sistema nervioso periférico es la *polineuritis idiopática* o *síndrome de Landry-Guillain Barre*, la cual se manifiesta, con frecuencia después de algunas infecciones víricas, por una parálisis aguda de los miembros inferiores. La causa primaria de ambas enfermedades, de la esclerosis y la polineuritis, reside en una reacción de autoinmunidad. Es decir, el sistema inmunológico, que reacciona como un órgano de defensa frente a sustancias extrañas al propio cuerpo, detecta en estos casos a la mielina (o a una parte de ella) como algo extraño y reacciona destruyéndola. Las pruebas más sólidas en favor de una etiología de tipo inmunológico se fundan, principalmente, en las semejanzas que existen entre las lesiones presentes en la esclerosis y en la polineuritis, por un lado, y en la *encefalitis alérgica experimental* y *neuritis alérgica experimental*, por otro. Estas dos últimas enfermedades se provocan en animales al inyectarles soluciones que contienen las proteínas A1 y P2, respectivamente.

En mi laboratorio investigamos algunos aspectos del proceso de desmielinización producido por la neuritis alérgica experimental (NAE). Inoculamos P2 en las patas traseras de un lote de ratas Lewis. Entre 15 y 30 días después, los animales comenzaban a presentar síntomas de debilidad en la cola y parálisis en las patas traseras, signos de haber contraído la NAE. Los nervios ciáticos de esos animales de experimentación se observaron por microscopía óptica en cortes gruesos teñidos con el método del nitrato de plata reducido de Cajal, modificado por V. Parthe, del Centro de Biofísica y Bioquímica del IVIC, quien es uno de los pocos histólogos que van quedando de la vieja escuela cajaliana. (La modificación del método original introducida por Parthe permite observar con gran nitidez las estructuras que, como las membranas celulares, están formadas por complejos lipoproteicos.) Aparecieron evidentes cambios vacuolares en muchas fibras, así como extensas zonas completamente desprovistas de mielina. Por su parte, la observación por difracción de rayos X de nervios provenientes de animales enfermos arrojó los siguientes datos: la distancia de repetición de la mielina era la misma que en los nervios de ejemplares sanos; no intervenían estados ordenados intermedios en el proceso de desmielinización, y, por último, las reflexiones de Bragg eran mucho menos intensas que



8. CINETICA DE REVERSION DE LA ANESTESIA. La gráfica tridimensional está constituida por una serie de patrones de difracción de rayos X de la mielina, registrados a partir de un nervio anestesiado, mientras tiene lugar la reversión del efecto anestésico debido a la perfusión con Ringer normal. La evolución temporal muestra que las reflexiones de orden par (8 y 10) aumentan en intensidad. A la derecha, se ofrecen algunos PAC registrados en distintos tiempos durante la recuperación: con el nervio anestesiado (tiempo cero), la altura del PAC y la velocidad de conducción son menores que con el nervio recuperado.



a
b
c
d
e
f
INTENSIDAD
N.º DE CANAL
2
4
3
5
6
8
10
11
12
13
g
h
e/Å³ (UNIDADES RELATIVAS)
179 Å

en los espectros de animales sanos, lo que indicaba que cantidad de material ordenado (mielina) era mucho menor en los nervios provenientes de animales enfermos de NAE.

Basados en esa observación, procedimos a registrar espectros de difracción de rayos X de mielina de nervios ciáticos de animales con lesiones desmielinizantes de diverso grado de severidad, encontrando una excelente correlación entre la gravedad de los desórdenes neurológicos y la disminución en la intensidad de las reflexiones de los espectros, lo que nos permitió cuantificar rápidamente y con precisión el porcentaje promedio de desmielinización en un nervio completo.

Para seguir avanzando en la comprensión del mecanismo de funcionamiento de la mielina, amén del relativo a su función aislante, será necesario, en un futuro inmediato, concentrar los esfuerzos paralelamente en dos direcciones. En primer lugar, habrá que desarrollar algoritmos matemáticos nuevos que nos permitan extraer la información estructural que hasta ahora no se ha podido calcular de los patrones de difracción de rayos X: el número de vueltas de membrana que rodea en promedio cada axón de un nervio completo, así como la cuantificación de la relación orden-desorden en la mielina, son parámetros contenidos en cada espectro de rayos X a los cuales nunca hemos tenido acceso de manera rutinaria. En segundo lugar habrá que conseguir un acceso directo a la estructura de la mielina paranodal. Quizás se hallen en ese órgano las respuestas a muchas cuestiones todavía abiertas en torno al mecanismo de generación y conducción del impulso en los nervios mielinados, así como sobre el proceso desencadenante de ciertas enfermedades que comportan la pérdida de mielina.

9. INDUCCION de la neuritis alérgica experimental en una rata. El vigor que muestran las patas traseras del animal (*arriba a la izquierda*) se ha perdido en la fotografía superior de la derecha. La micrografía de la izquierda corresponde a un corte transversal de su nervio ciático, teñido con la técnica del nitrato de plata reducido de Cajal, y en él se observa un elevado número de axones bien mielinizados. La micrografía de la derecha pone de manifiesto otro corte transversal del nervio ciático de la rata enferma. En *e*, se ofrece el patrón de difracción de rayos X del nervio proveniente de la rata sana, que evidencia la fuerte intensidad de las reflexiones; en *g*, el perfil de densidad electrónica derivado del patrón antes mencionado; *f* recoge el patrón de difracción de rayos X del nervio desmielinizado y evidencia la drástica caída de la intensidad de las reflexiones (en escala logarítmica); y *h* da el perfil de densidad electrónica derivado del patrón mostrado en *f*.

Juegos de ordenador

Algoblemas: problemas donde el pensamiento avanza hacia la solución por vías algorítmicas

A. K. Dewdney

Problevilla y Soluciobburgo distan 100 kilómetros. A las 12 de la mañana de un tórrido día de agosto parte un tren de cada ciudad y se dirige a 50 kilómetros por hora hacia la otra. Al mismo tiempo, un abejorro que había estado dormitando cómodamente sobre el gran faro de la locomotora de Problevilla despierta a la vida y echa a volar sobre la línea férrea, dirigiéndose hacia Soluciobburgo a 90 kilómetros por hora. Cuando el abejorro se tropieza con el tren procedente de Soluciobburgo, da bruscamente media vuelta y regresa por el camino que traía, siempre a 90 kilómetros por hora. Al encontrarse con el tren de Problevilla da otra vez media vuelta, y así continúa hasta que los trenes se encuentran. ¿Cuántos kilómetros habrá recorrido en ese momento el abejorro?

La solución de este conocido problema, que daremos hacia el final del artículo, es breve. Tanto, que se reduce a un número. Otros problemas, a los que llamo "algoblemas", tienen soluciones más complejas, que no son cifras, sino recetas o procedimientos encaminados a lograr una determinada situación. Con otras palabras, la solución de un algoblema es un algoritmo. La literatura aproblemística tradicional está llena de algoblemas. Tal vez se nos pida repartir en tres dosis iguales el líquido contenido en un recipiente, merced a una sucesión de operaciones de trasvase con vasijas de capacidades prefijadas. Puede que, mediante una sucesión de operaciones de transbordo, hayamos de llevar en bote, de una a otra orilla de un río, un lobo, una cabra y una col. Puede incluso que nos pidan descubrir una moneda defectuosa (por pesar mucho o poco) mezclada con otras muchas, mediante una serie de pesadas con una balanza.

Un ejemplo explícito permitiría establecer claramente la diferencia entre un problema ordinario y un algoblema. Para poner en marcha el tren de pensamiento necesario, proseguiré por las mismas vías que ya tendí en el primer problema. Por fortuna, en este segundo ejemplo no es preciso que, tras un paroxismo de vaivenes infinitesimales, los trenes dejen despachurrado al pobre abejorro. En vez de chocar, los trenes se avistan mutuamente con tiempo suficiente para frenar. Oímos el fortísimo siseo retumbante del vapor; el agudo chirrido de los frenos, acero contra acero. (No sé por qué me estoy imaginando dos leviatanes de la era de los trenes de vapor.) Queda entre los trenes un breve tramo de vía y un apartadero de longitud justa para una locomotora o un vagón [*véase la figura 1*]. Evidentemente, alguien ha cometido un grave error al establecer los horarios de salidas. El único modo de salir del dilema es que los maquinistas ingenien alguna forma de que los trenes se crucen. Tanto en ese problema como en los sucesivos se supondrá que los vagones y las máquinas pueden engancharse por sus dos extremos. Se supondrá igualmente que junto a cada tren corre un guardafrenos dispuesto a acoplar o desenganchar los vagones que se le indique.

El maquinista del tren de Problevilla se enjuga el sudor con un pañolón de lunares y comenta, "No veo cómo vamos a cruzarnos. Sólo disponemos de aquel pequeño apartadero". El maquinista de Soluciobburgo es más optimista, y esboza un plan para que los trenes prosigan la marcha. ¿Resultará factible? Seguramente convenga que los lectores echen un vistazo a la ilustración antes de proseguir. En concreto, los trenes que consideramos constan de cinco vagones cada uno. No obstante, en un verdadero algoblema los trenes tienen siempre n coches.

Es muy posible que mientras resolvía este algoblema (bastante sencillo, la verdad) el lector haya musitado algo más o menos así: "Bueno, vamos a ver. ¿No bastaría ir metiendo uno por uno en el apartadero los vagones del tren de Problevilla? El tren de Soluciobburgo no tendría más que ir adelante y atrás, llevar un vagón del otro tren al apartadero cuando vaya en una dirección, pasar completamente de largo, empujarlo después por el otro lado para sacarlo del apartadero y repetir la operación."

Aunque tal descripción proporciona un punto de partida para resolver el problema, es preciso formularla más explícita y claramente. El formato algorítmico resulta ideal a tal fin. Asimismo, un poco de notación contribuirá también a facilitar las cosas. Cuatro son los principales tramos de vía que participan en la solución: el que va desde Problevilla hasta el apartadero (A), el tramo comprendido entre las agujas del apartadero (B), el apartadero propiamente dicho (B') y el tramo que lleva desde el apartadero hasta Soluciobburgo (C). Una instrucción como "Adelante A" significa que el tren de Soluciobburgo, compuesto por la locomotora y todos los vagones que tenga enganchados en ese momento, ha de avanzar hasta encontrarse por completo en el tramo A de la vía.

Por supuesto, ambos trenes tienen n vagones. La locomotora del tren de Problevilla se ha rotulado $P1$; sus vagones, $P2$, $P3$, etcétera. La instrucción "enganchar Pk" significa que uno de los extremos del tren de Soluciobburgo se encuentra en ese momento contiguo al k-ésimo elemento del tren de Problevilla; el tren de Soluciobburgo va rodando lentamente hacia Pk y lo engancha con el maravilloso tableteo que recordamos bien quienes hemos vivido cerca de las estaciones de ferrocarril.

Estamos ya en condiciones de dar el algoritmo:

desenganchar el tren P
desde $k = 1$ hasta $n + 1$
  adelante hasta A
  enganchar Pk
  atrás hasta C
  adelante hasta B'
  desenganchar Pk
  atrás hasta C
  adelante hasta A
  atrás hasta B'
  enganchar Pk
  atrás hasta C
  desenganchar Pk
enganchar el tren P

Se empieza por descomponer el tren P entero, desacoplando todas sus unidades, con lo que quedarán una locomotora y n vagones sueltos. Seguidamente, el algoritmo inicia la ejecución de un bucle, en el cual se repiten una y otra vez los mismos 11 pasos. El tren de Soluciobburgo se hace cargo de todo el trabajo. Sin desenganchar ninguno de sus vagones, empieza avanzando hasta quedar totalmente en la sección A de la vía, donde engancha la primera unidad ($k = 1$) del tren de Problevilla,

a saber, su locomotora. Dando marcha atrás, arrastra la locomotora hasta la sección C de la vía y, tras cambiar agujas para entrar en el apartadero, la empuja hasta dejar la locomotora en el desvío, donde la desengancha. A continuación, el tren de Soluncioburgo vuelve a dar marcha atrás hasta la sección C, cambia agujas y avanza nuevamente hasta la sección A. Vuelve entonces a entrar en el apartadero dando marcha atrás, se acopla a la máquina de Problevilla y la empuja, sacándola del apartadero hasta dejarla en la sección C, donde la desengancha. Debe repetirse la misma serie de pasos con cada uno de los vagones del tren de Problevilla. Al completar el bucle principal el tren de Problevilla se encontrará, respecto del tren de Solucioburgo, del lado de Solucioburgo y, en cuanto se reponga de la laboriosa operación algorítmica, estará listo para reanudar viaje hacia Solucioburgo.

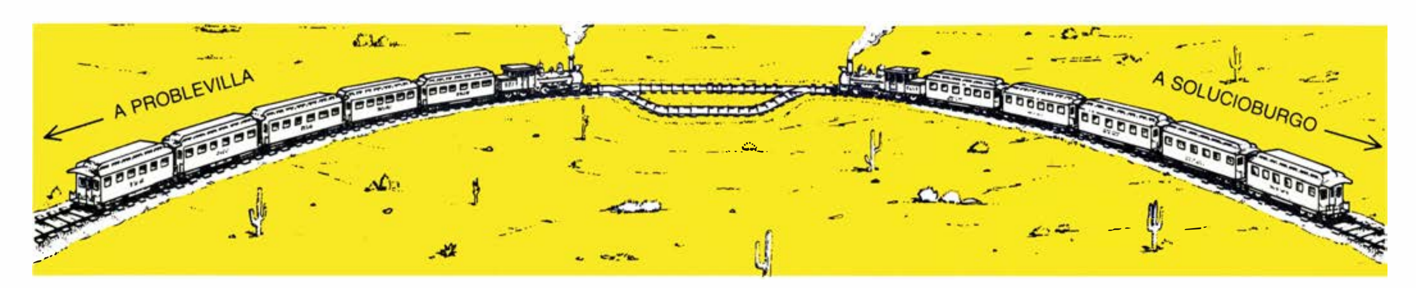
El siguiente ejemplo de algoblema se plantea cuando el tren de Problevilla está casi llegando a Solucioburgo. El maquinista, absorto en la contemplación del paisaje, cae súbitamente en la cuenta de que se ha olvidado el almuerzo. No le queda más remedio que regresar. Aplica los frenos y detiene suavemente la enorme masa del tren de n vagones. Nada menos atractivo que regresar marcha atrás hasta Problevilla. Por fortuna, el maquinista ve a su derecha un tramo de vía muerta que dispone de agujas para enlazar en ambos sentidos, pero que tiene la longitud justa para un solo vagón. Inspirado por la reciente proeza algorítmica del maquinista de Solucioburgo, no está dispuesto a darse por vencido.

En primer lugar, el maquinista de Problevilla traza sobre el papel un diagrama de la vía muerta [*véase la figura 2*]. Seguidamente redacta un algoritmo y se cerciora cuidadosamente de que va a funcionar, repasando los movimientos con el dedo y musitándolos para sí. Por fin, inicia una larga y laboriosa serie de desenganches, cambios de vía y reenganches que al cabo producen el cambio de orientación del tren entero. No sólo ha quedado totalmente invertido el orden de los vagones y la máquina, sino que tanto ésta como los vagones se encuentran todos mirando en sentido contrario al que tenían. ¿Cómo lo consiguió? Espigaré las mejores soluciones de entre las primeras que me envíen los lectores y las daré a conocer. En este caso, "mejores" significa tanto más claras cuanto más ingeniosas. Hay en el problema más tela que cortar de lo que parece a primera vista.

Ya de camino a recoger el almuerzo, el maquinista de Problevilla se percata de que su solución le ha hecho consumir muchísima energía. ¡Apenas queda carbón en el ténder! La cantidad de trabajo realizada por el tren ha sido proporcional a n^2 pues, si se toma el vagón como unidad de masa y también de longitud, ha desplazado un número de vagones del mismo orden de magnitud que n a lo largo de una distancia que es también del orden de n. Hasta ahora, ya camino de casa, no se le había ocurrido reflexionar sobre la posibilidad de que existieran soluciones más eficientes. ¿Será posible darle la vuelta al tren en menor número de pasos, del orden de $n^{3/2}$, o incluso de $n \cdot \log n$?

Con el propósito de entrenar en las nobles artes de la algoblemática a las mentes "de vía única", he aquí un pequeño y precioso rompecabezas. Una locomotora solitaria se dirige hacia un circuito en el que están detenidos dos vagones vacíos. Entre los vagones hay un puente cuya resistencia es la justa para soportar el peso de un vagón, pero no el de la locomotora [*véase la figura 3*]. El maquinista tiene que invertir las posiciones de los vagones. Lo mismo que en los algoblemas precedentes, todas las operaciones de enganche y desenganche han de hacerse con el tren parado. (Dicho de otro modo, no es lícito cambiar agujas "al vuelo".) La longitud del puente no es mayor que la de un vagón. Al terminar la tarea, la locomotora debe quedar fuera del bucle circular. La solución de este problema es un algoritmo sencillo, sin bucles. Los lectores encontrarán un esbozo de ese algoritmo en el próximo número.

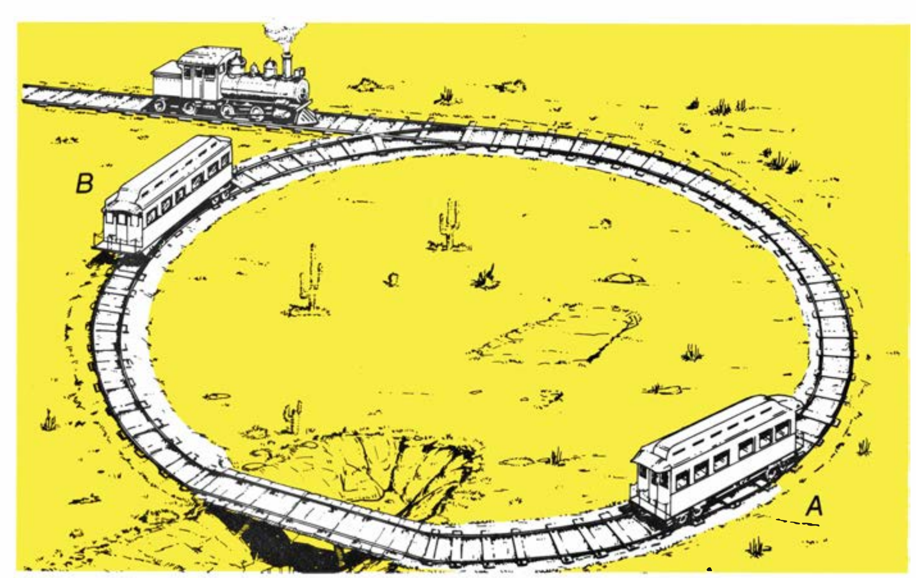
Los dos próximos algoblemas me eran desconocidos. Aunque el tema de fondo sigue siendo el transporte, como en el caso de los trenes, esta vez la indagación va en "directa", por tratarse ahora de todoterrenos. Los he llamado problemas del Zorro del Desierto. En el primero, un vehículo de patrulla perteneciente al Zorro del Desierto tiene un depósito de combustible con capacidad para 40 litros de gasolina. El depósito se llena tomando gasolina de unos bidones de 200 litros, que se guardan en un almacén de intendencia. Supongamos que el vehículo no pueda cargar con más de un bidón, y que sea capaz de recorrer 5 kilómetros por litro, tanto si va cargado con el bidón como si no. ¿Qué distancia podrá recorrer hasta agotar la gasolina? La so-



1. ¿Cómo seguirán camino los trenes?



2. ¿Cómo dar la vuelta al tren, para recuperar el almuerzo que el maquinista se dejó en Problevilla?



3. La máquina tiene que permutar la posición de los vagones sin pasar por el puente, que no la soportaría

lución dependerá, claro está, del número de bidones disponibles en el almacén. Imbuidos del espíritu generalizador característico de la algoblemática, se supondrá que el número de bidones es *n*.

La solución es sencilla cuando *n* es igual a 1. Se llena el depósito con la gasolina del único bidón, se carga éste en el vehículo y se sale de patrulla bajo el sol ardiente del desierto. Rellenando su depósito con el combustible del bidón cuando sea necesario, el vehículo alcanza a recorrer 1000 kilómetros hasta agotar el combustible. Ahora bien, ¿cuánto podrá viajar el vehículo cuando sean dos los barriles? Dado que sólo puede llevar consigo un bidón, se adentrará con él en el desierto hasta cierta distancia, repostará de su contenido en caso necesario y regresará al almacén a por el segundo bidón. Sale de patrulla con el segundo bidón por la misma ruta. Quizá se detenga a repostar del primer bidón antes de proseguir camino; quizá no. ¿Hasta donde llegará de ese forma, haciendo vaivenes de uno a otro? De repente, el problema nos parece menos trivial.

He aquí un algoritmo breve que garantiza al vehículo de patrulla un viaje de 1200 kilómetros. El jeep parte del almacén.

llena el depósito del vehículo y carga el primer barril
avanza 100 km
descarga el barril y reposta
regresa a la base por el segundo barril
reposta y carga el barril
avanza 100 km
reposta del primer barril
avanza 100 km
descarga el barril y reposta
regresa por el primer barril
reposta y carga el barril
avanza 100 kilómetros

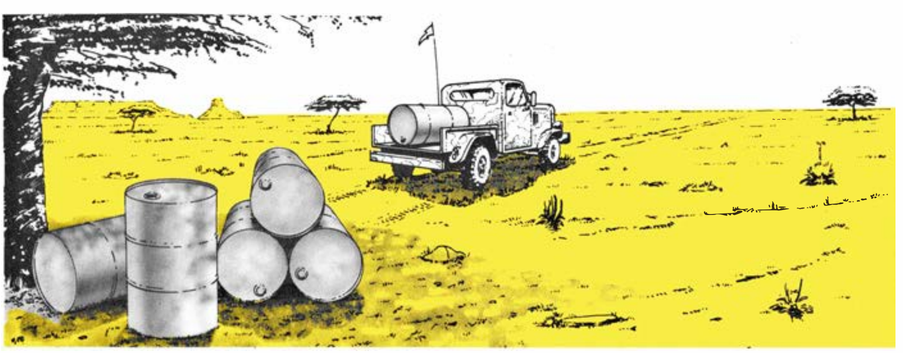
En esta fase del algoritmo el vehículo se encuentra a 500 kilómetros de la base. Lleva dos barriles. El primero aún contiene 40 litros y, el segundo, todavía 160. El conductor rellena el depósito con el contenido del primer bidón (que abandona vacío), carga el segundo bidón y prosigue la exploración de las dunas. Puede recorrer todavía 1000 hasta quedarse sin combustible. La distancia total viajada será de 1200 kilómetros. Puesto que la mejora sobre el caso de barril único es tan sólo de 200 kilómetros, probablemente los lectores se estén preguntando ya si existe un algoritmo más eficaz. En efecto, puede lograrse lo que el enemigo del Zorro del Desierto juzgaría de "kilometraje bestial".

¿Hasta dónde llegaría el Zorro del Desierto en el caso de que su almacén dispusiera de *n* barriles? Imbuidos del espíritu algoblemático, no aceptaremos por solución meras fórmulas. Es preciso especificar el algoritmo que nos lleva a la solución.

En otro lugar del vasto dominio arenoso que el Zorro del Desierto tiene (provisionalmente) como hogar existe una ruta patrullada por el enemigo, que éste recorre de modo muy distinto. La ruta constituye un circuito cerrado; un avión lanza *n* bidones de combustible en puntos arbitrarios situados a su largo. Cada bidón contiene cierta cantidad de gasolina, que puede variar considerablemente entre los diversos bidones [*véase la figura 5*]. Dado que la descubierta se hace en territorio hostil, vehículo y conductor se lanzan en paracaídas. Toman tierra cerca de uno de los bidones y, tras cargar combustible, el conductor emprende el viaje en torno al circuito. El depósito de su vehículo es ampliable y lo supondremos capaz de contener cualquier cantidad de combustible, sea cual fuere el tamaño del bidón con que se encuentre.

Resulta muy curioso que en el curso de su patrulla el vehículo jamás agota el combustible antes de llegar a un nuevo barril. En realidad, la cantidad total de combustible que contienen los bidones es exactamente la necesaria para que el vehículo de vigilancia describa un circuito completo, sin que sobre ni falte. Este hecho llama fuertemente la atención pues, como se ha dicho, el emplazamiento de los bidones y el reparto de las cantidades de combustible que contienen son completamente arbitrarios. Por ejemplo, resulta perfectamente posible que el coche comience su viaje en un bidón que no contenga combustible suficiente para permitirle llegar al bidón siguiente en ninguno de los sentidos. O bien que sí puedan alcanzarse algunos de los bidones siguientes, y quedarse luego atascado en algún otro lugar, más adelante. ¿Cómo explicar, entonces, la hazaña de recorrer el circuito entero?

El Zorro del Desierto ha observado esas patrullas y está francamente perplejo. Es cosa sabida que el enemigo está loco. ¿Será que además tiene suerte? Un subordinado del Zorro, que se pasa las noches resolviendo rompecabezas en su tienda, descubre la solución. "Señor, parece que indepen-



*4. ¿Cuánto podrá alejarse el camión si dispone de **n** bidones de combustible?*



5. ¿De dónde deberá partir el jeep para tener certeza de que completará con éxito el circuito?

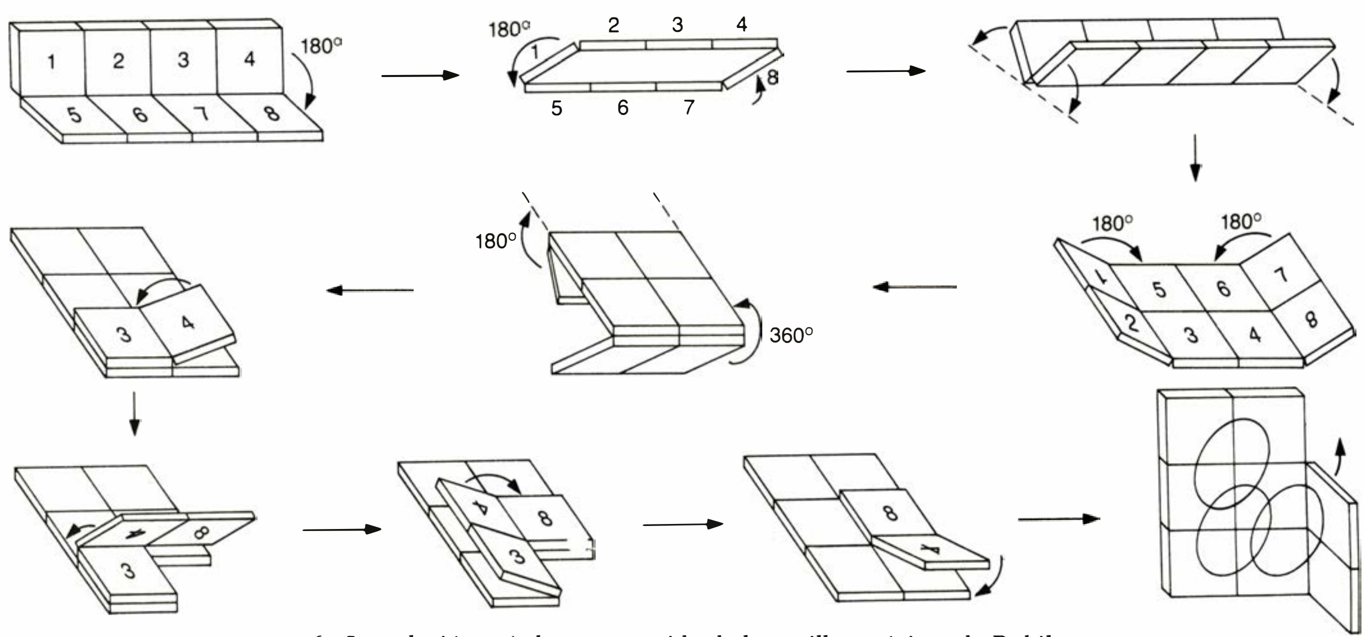
dientemente de los puntos donde sean lanzados los barriles, y de la cantidad de combustible que contengan, siempre hay un lugar desde el cual puede el coche emprender viaje con plenas esperanzas de terminarlo."

Dejo al cuidado del lector el revelar el secreto. Desde luego, hace falta un algoritmo. Es preciso hallar primero un procedimiento para determinar paso a paso al menos un barril desde el cual pueda partir el coche y completar el circuito.

Al principio del artículo prometí revelar la solución del problema del abejorro y los trenes. Las duchos en plantear problemas suelen tomar la precaución de desorientar a los lectores, sobre todo si el problema tiene solución sencilla. Al describir el número infinito de cambios de sentido del vuelo del abejorro traté deliberadamente de confundir a los lectores. Para resolver el problema basta con advertir que el tiempo de vuelo del abejorro es el que tardan los trenes en encontrarse. Estos recorren la mitad de la distancia entre Problevilla y Solucioburgo en una hora. El abejorro, que vuela siempre a 90 kilómetros por hora, recorre, pues, 90 kilómetros.

Un aluvión de lectores ha escrito a propósito del artículo de Wolfgang Glebe sobre los anillos mágicos de Rubik, publicado en la edición de mayo. Muchos proponen rutas propias hacia la solución. En particular, y con diversas variantes, se insiste en una vía notablemente más breve que la ofrecida por Glebe; se llega a la solución en sólo 12 o 13 pasos, según el modo de contaje adoptado. Se trata, parece, del procedimiento más corto posible para entrelazar los anillos.

La figura 6 muestra los pasos pertinentes. El primero consiste en una transformación especularmente simétrica a la que Glebe denotó R, que, de buen principio, lleva el rompecabezas a una configuración asimétrica. Seguidamente se aplica una variante abreviada de la transformación que Glebe denominó F. Se alcanza así otra de las 16 configuraciones asimétricas de 4 × 2. A partir de ese punto basta seguir el elegante procedimiento que muta la configuración de 4 × 2 en otra de 3 × 3 sin uno de los vértices para alcanzar, céleres, la meta final.



6. La solución más breve conocida de los anillos mágicos de Rubik

Taller y laboratorio

Rompecabezas en dos y tres dimensiones y las reglas para simplificar su solución

Jearl Walker

Los rompecabezas consistentes en disponer piezas en formas bidimensionales o tridimensionales están de moda. ¿Es posible concebir reglas que los simplifiquen de modo que no sea necesario considerar todas las colocaciones viables? En busca de tales reglas, comencé con un rompecabezas plano de tipo corriente en forma de cuadrado. Lo rehice luego sobre tres tableros de juego no convencionales que se arrollan hacia atrás sobre sí mismos. Finalmente, estudié algunos rompecabezas tridimensionales creados por Adrian Fisher, de Minotaur Designs. Estos parecen ser los más difíciles de su especie.

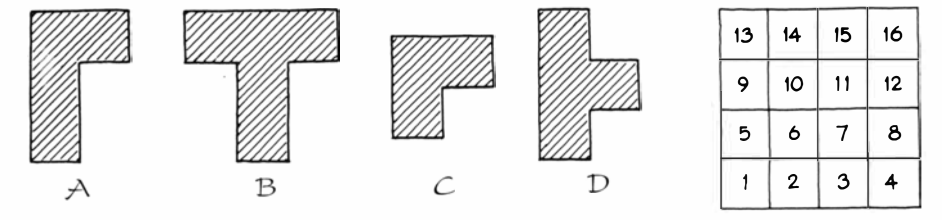
Mi primer rompecabezas fue uno plano compuesto de cuatro piezas. ¿Cómo debían colocarse para que formaran un cuadrado? ¿Cuántas soluciones de ese tipo había? Este rompecabezas, muy sencillo, se resuelve mentalmente, sin necesidad de mover siquiera las piezas. Con la esperanza de descubrir reglas o pautas válidas para rompecabezas más complicados, me decidí a estudiarlo de una manera sistemática. Mi primer tablero era un cuadrado vacío de cuatro por cuatro casillas. ¿Qué pieza debía colocar primero? Como la pieza *C* ocupa sólo dos casillas vertical y horizontalmente, el número de posiciones posibles sobre el cuadrado es mayor que el de las otras piezas, que abarcan tres casillas en una o más direcciones. Decidí comenzar por *B*, la mayor.

B puede tener cuatro orientaciones: *T*, *T* invertida, *T* horizontal con la cabeza a la izquierda y *T* horizontal con la cabeza a la derecha. Para cada orientación, la pieza puede colocarse en el cuadrado en cuatro posiciones; diríase, pues, que el total de colocaciones iniciales suma 16. Mas, para esta pieza, sólo existen realmente cuatro posiciones iniciales, ya que hay que descontar las doce correspondientes a girarla en su propio plano, o a rotar el tablero sin mover la pieza, para obtener así lo que a primera vista parecerían posiciones diferentes. Esta reducción de orientaciones sólo es posible con la primera pieza. A partir de ésta, cada pieza adicional debe considerarse en todas sus orientaciones posibles. Como movimiento inicial de *B*, elijamos la orientación de *T* invertida.

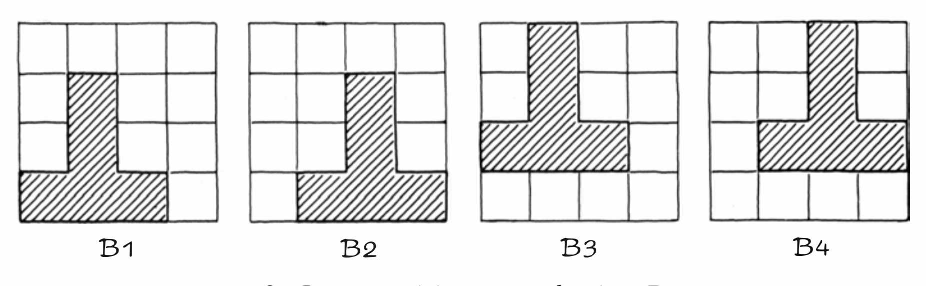
B puede colocarse en el cuadrado de cuatro maneras distintas. Ahora bien, como la pieza es simétrica, la posición *B*2 se reduce a la *B*1 si le damos la vuelta al rompecabezas. Por la misma razón, *B*4 es la misma que *B*3. Por tanto, las ubicaciones posibles de *B* en el cuadrado se limitan a dos: *B*1 y *B*3. No hace falta continuar ensayando con *B*3, porque los "agujeros" que deja en las casillas 9 y 13 del tablero no pueden ocuparse con ninguna de las otras tres piezas.

Juguemos ahora *A*. De los seis modos en que es posible colocarla, cinco dejan agujeros imposibles. En la figura 3 se ilustra una posición con posibilidades (*A*1) y un lance vano (*A*2).

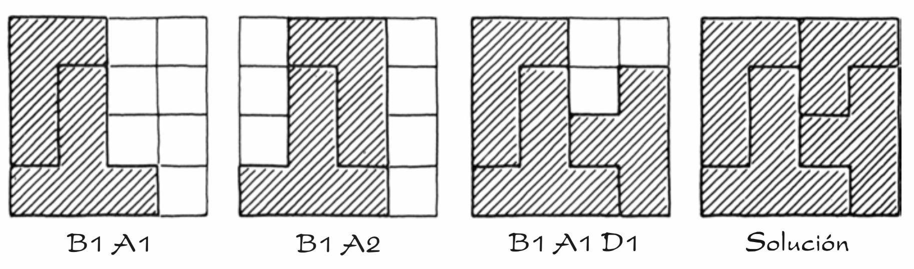
Seguidamente, a la posición *A*1 le añadimos *D*. De las tres maneras en que puede colocarse, sólo una (*D*1) evita agujeros imposibles. Finalmente, se completa el cuadrado encajando la pieza *C*. Como se ha reducido el rompecabezas a un orden de colocación único cuyo resultado es una solución, ésta será también única. (Su imagen es-



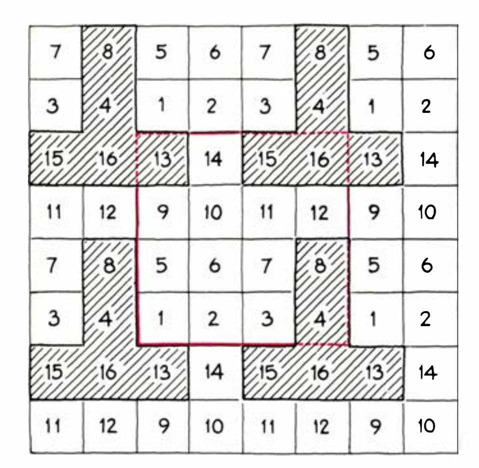
1. Rompecabezas plano de cuatro piezas y su tablero



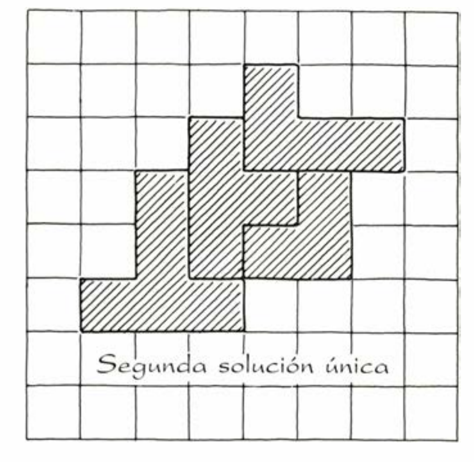
2. Cuatro posiciones para la pieza B



3. Ajuste de las cuatro piezas en el tablero



4. Tablero de un rompecabezas toroidal plano



5. Soluciones para el tablero toroidal plano

pecular será otra solución, pero no es exclusiva.)

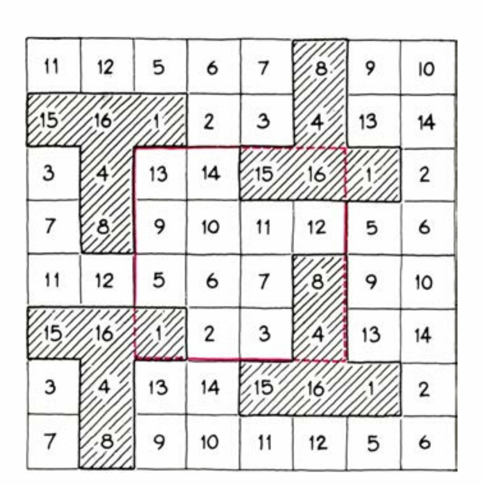
Al resolver así el rompecabezas, aprendí algunas reglas de procedimiento. La primera pieza debe ser grande, para reducir el número de posiciones de apertura. La orientación de esta primera pieza puede elegirse arbitrariamente, ya que cualquier otra orientación requiere sólo que se rote el tablero en su plano o se le dé la vuelta. Si la primera pieza es simétrica, al menos en torno a un eje, no es necesario considerar sus imágenes especulares.

Hay posiciones de una pieza que pueden eliminarse si dejan agujeros inviables, es decir, espacios fuera de las posibilidades de las piezas restantes o que requieren piezas de contornos no disponibles. Ejemplos corrientes de esto son los espacios (uno o dos) que puedan quedar aislados junto a los bordes del tablero. El juego recién descrito es simple porque, cuando se añade la segunda pieza, sólo es viable una de sus posiciones. Los rompecabezas más entretenidos presentan varias posiciones viables que hay que seguir teniendo en cuenta conforme se van añadiendo piezas.

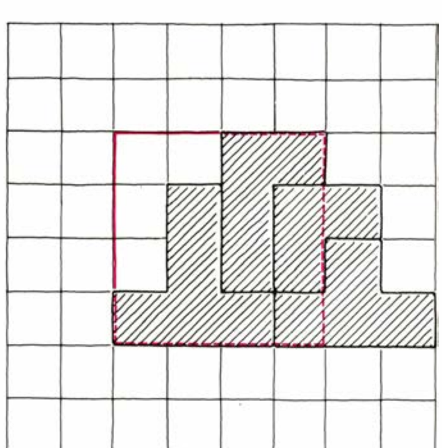
El estudio de distintos rompecabezas lo simultaneé con la lectura del libro *The Shape of Space. How to Visualize Surfaces and Three-dimensional Manifolds*, de Jeffrey R. Weeks. Se trata de una obra fascinante en la que se describen varios juegos que se desarrollan en una superficie plana como la de mi tablero. Pero difieren en que los bordes de las superficies no son reales: los bordes izquierdo y derecho están unidos entre sí, al igual que lo están el superior y el inferior. Si abandonamos mentalmente el cuadrado por el lado izquierdo, volvemos a entrar en él por la correspondiente casilla del lado derecho. Análogamente, una salida por arriba significa un regreso al cuadrado por abajo. Un cuadrado tal equivaldría a la representación plana de un toro, o de un buñuelo, de suerte que, al movernos hacia la derecha o la izquierda, lo que hacemos es circunvalar el toro, y al desplazarnos hacia arriba o hacia abajo, lo que hacemos es dar la vuelta por el agujero del toro y regresar a la parte delantera. Sugiere Weeks que los juegos pueden desarrollarse con mayor claridad en estos tableros si en torno al cuadrado primario se dibujan otros idénticos. A un tablero así dispuesto, lo llamaré tablero ampliado.

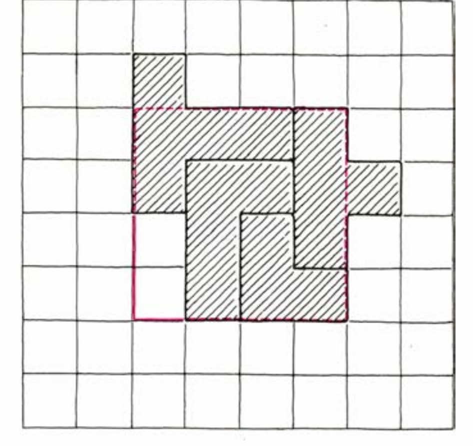
Supongamos ahora que jugamos con las cuatro piezas de nuestro primer rompecabezas sobre este nuevo tablero. Por norma, la colocación de una pieza no suele ser válida si sobresale del cuadrado. En el nuevo tablero, esto es admisible: la parte que "sobresale" la acepta el cuadrado por el lado opuesto. En la figura 4 se representa un ejemplo. Obsérvese que *B* ocupa tres zonas separadas en el cuadrado primario.

Ahora, nuestro rompecabezas posee muchas más soluciones; pero, ¿son únicas? Imaginemos que, sobre el tablero, disponemos la solución normal, ya conocida, pero desplazándola una o más casillas en dirección horizontal, vertical o en ambas. Las porciones de las piezas que rebasen el cuadrado primario por uno de sus lados retornan al mismo por el lado opuesto. Por ejemplo, mova-

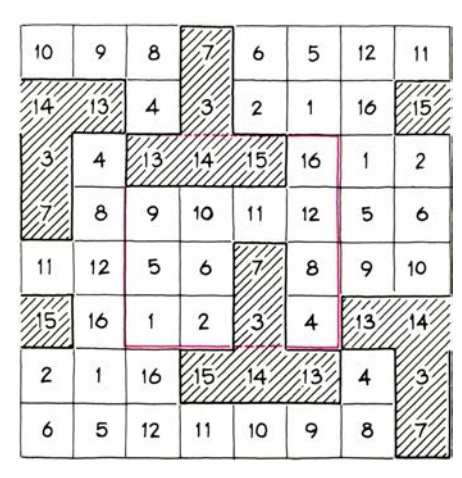


6. Tablero con dos bordes conectados a través de una torsión

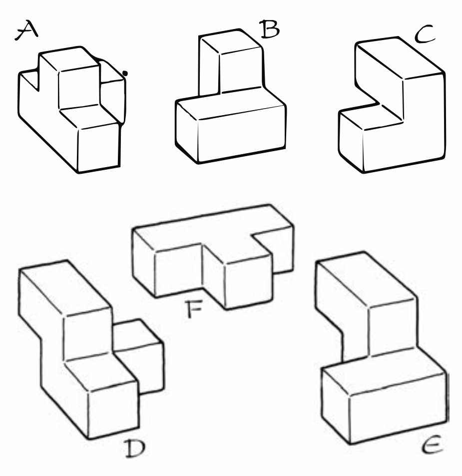




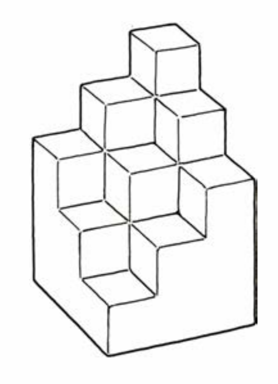
7. Soluciones para el tablero con dos bordes conectados a través de una torsión



8. Tablero con 2 uniones de torsión



9. Piezas del Cubo Minotauro



10. Solución de diamante

mos la solución normal, toda a una vez, una casilla hacia la izquierda. Entonces, los extremos izquierdos de *A* y *B* irán a parar al lado derecho del cuadrado. Tales desplazamientos simples de las soluciones normales no constituyen soluciones únicas nuevas.

En la figura 5 se ilustra una manera práctica de representar la solución normal. *B* se encuentra con su orientación normal y las demás piezas se agrupan a su derecha. A esta disposición la llamaremos configuración ampliada. Imaginemos que esta configuración la colocamos en cualquier sitio del tablero nuevo. En tanto los bordes de *B* sean paralelos a los lados del tablero, la configuración llenará limpiamente el tablero. Coloquémosla, por ejemplo, de modo que *B* esté en la parte superior derecha del cuadrado. En tal caso, las otras piezas desaparecerán automáticamente por los bordes superior y derecho y reaparecerán por los bordes opuestos, para volver a llenar el tablero. La imagen especular de esta solución es también una solución, pero no única.

¿Posee este rompecabezas más soluciones únicas? Sí, las tiene; podemos contar hasta cuatro más, todas con su imagen especular. Una de ellas se muestra en la ilustración. El lector puede colocarla sobre el tablero en cualquier posición; verá así que lo llena exactamente. Y le sugiero que se entretenga buscando los demás. Debe hacerse sistemáticamente, aplicando las reglas que he ofrecido con relación al rompecabezas normal. Puede trabajar también con las configuraciones ampliadas, dando mentalmente la vuelta a las porciones de las piezas que se desbordan por la derecha o por arriba. Cuidado con las soluciones especulares: no hay que tenerlas en cuenta.

Otra forma de conectar los bordes de un tablero de juego es mediante una torsión. En este caso, los bordes superior e inferior se unen como antes, pero el derecho y el izquierdo se retuercen mentalmente una vez antes de unirlos. Resulta así una representación plana de la botella de Klein, una fantasía topológica. Si nos desplazamos mentalmente hacia la izquierda partiendo de la casilla 1, reentraremos en el cuadrado por la 16. Los movimientos hacia arriba y hacia abajo son los mismos que en el tablero toroidal plano.

En este tablero encaja perfectamente la solución normal, pero no siempre es posible trasladarla con éxito. En la figura 7 se presentan dos soluciones únicas más. Coloquémoslas, con la imaginación, sobre el cuadrado primario de un tablero ampliado. Se advertirá que podemos trasladarlas horizontalmente, pero no verticalmente. Asimismo se observará que *B* posee distintas orientaciones en estas soluciones. Como sólo están unidos a través de una torsión los bordes izquierdo y derecho, las diferentes orientaciones de la primera pieza jugada ya no pueden reducirse a una sola en virtud de una rotación del tablero. ¿Cuántas soluciones únicas tiene ahora el rompecabezas?

Un cuarto tipo de tablero puede conseguirse conectando los bordes superior e inferior a través también de una torsión. (Técnicamente, este tablero no constituye ninguna representación plana si atendemos al modo en que las esquinas se corresponden entre sí; compruébese la esquina inferior derecha del cuadrado primario: en ese punto, sólo coinciden las casillas 4 y 13, y no las cuatro casillas distintas como en los otros tableros enlazados.) Evitaremos mejor los errores si el juego se desarrolla sobre una versión ampliada del tablero. La figura 8 ilustra cómo podría jugarse *B*. Es evidente que si desplazamos la pieza una casilla a la derecha, el juego se invalida porque la pieza ocupa entonces dos veces la casilla 4. ¿Cuántas soluciones únicas del rompecabezas posee este tablero?

Las formas de las piezas las elegí de modo que fuera posible una solución para un tablero de juego normal. Cabe preguntarse ahora si es posible elegir otras formas que brinden una solución en sólo uno de los tableros. En el toroidal plano, con las piezas que hemos empleado, se admiten cinco soluciones únicas. Si el rompecabezas lo cambiáramos de modo que tuviera únicamente una pieza cuadrada que ocupara cuatro casillas por lado, todos los tableros tendrían una sola solución. Imaginemos ahora piezas de otras formas. ¿Cuáles de éstas hacen máximo el número de soluciones para cada tablero? Quizá resulte interesante investigar rompecabezas mayores, para descubrir si pueden deducirse conclusiones generales aplicables a rompecabezas de cualquier tamaño.

Este sencillo rompecabezas lo estudié como preparación para acometer los tridimensionales de Fisher. En su creación y elaboración, Fisher comenzó por examinar de cuántas maneras pueden juntarse los cubos básicos para formar las diferentes piezas que integran los policubos. Hay dos tricubos (tres cubos unidos), ocho tetracubos, 29 pentacubos y 166 hexacubos.

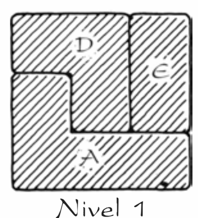
Un pasatiempo de policubos muy conocido, consistente en encajar piezas de este tipo hasta formar un cubo de tres casillas por arista, es el Soma, inventado por Piet Hein y presentado en 1958. En el reciente libro de Martin Gardner *Knotted Doughnuts and Other Mathematical Entertainments* pueden encontrarse notas actualizadas acerca de este juego y bibliografía relativa al mismo. Se emplean un tricubo y seis tetracubos. (El tricubo y el tetracubo rectos no se emplean, ni tampoco el tetracubo cuadrado.) El número de soluciones es exactamente de 240.

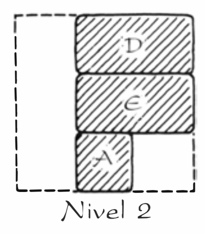
Preguntóse Fisher por qué la complejidad de un rompecabezas dependía del número de piezas. Si éstas fueran sólo 27 cubos básicos y separados, o incluso nueve tricubos, el pasatiempo tendría poquísimo de rompecabezas. Tampoco encerraría especial atractivo si constara de sólo dos o tres piezas. Llegó a la conclusión siguiente: el mejor número de piezas para un rompecabezas cuya solución sea un cubo de tres casillas por arista se cifra en seis. Hipótesis que comprobó ensayando con los alumnos de una academia preparatoria de Londres; la prueba que les puso consistió en resolver siete rompecabezas cúbicos cuyo número de piezas variaba de tres a nueve.

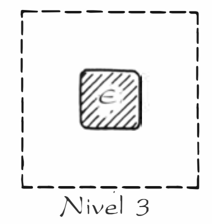
Registrando el tiempo medio de resolución que necesitó cada rompecabezas y la proporción de resultados correctos, Fisher vio que el de seis piezas era el que, desde luego, consumía más tiempo y el que más fracasos daba. A continuación, se clasificó el rompecabezas de cinco piezas, seguido de cerca por el de siete. Para aumentar la complejidad de sus rompecabezas, Fisher tuvo la idea de diseñar las piezas de modo que fueran aproximadamente del mismo tamaño, pero sin que hubiera dos idénticas ni una fuera imagen especular de otra. Cuando se ensamblan, ninguna de ellas está en contacto con una segunda en más de dos caras.

Uno de los resultados de los trabajos de Fisher es el Cubo Minotauro, formado por tres tetracubos y tres pentacubos. La construcción de un cubo de tres casillas por arista tiene una sola solución. Este rompecabezas puede, asimismo, ensamblarse y constituir una estructura escalonada: la solución diamante, que recuerda las formaciones cristalinas.

Mis indagaciones en torno a la solución única las inicié haciendo una lista de las ubicaciones posibles de la pieza *A*, una de las mayores. En aquella ocasión, el tablero de juego era un cubo vacío. Al igual que en los rompecabezas planos, la orientación de la colocación de la primera pieza era arbitraria, pues todas las demás orientaciones se reducían a la primera con sólo rotar el tablero. Para una orientación dada, *A* gozaba de cuatro posiciones posibles. Seguidamente añadí *D*, que presentaba un total de 34 posiciones posibles para la totalidad de las posiciones posibles de *A*. Para cada una de ellas, consideré todas las posibles posiciones de *E*. Tras haber jugado tres o cuatro piezas, comencé a eliminar algunas configuraciones, pues creaban agujeros imposibles; con todo, cuando hallé la







11. Encaje de las piezas en un tablero cúbico

solución, el catálogo de posiciones era muy nutrido.

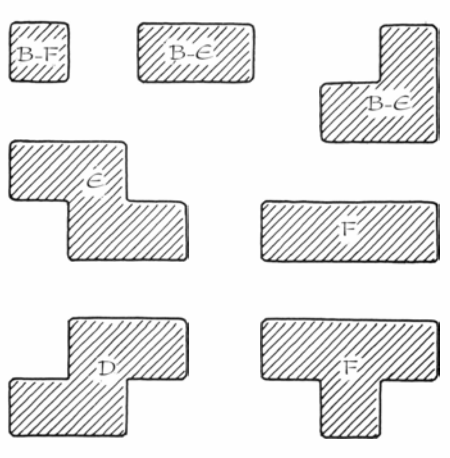
Una de las razones por las que los rompecabezas tridimensionales son más difíciles que los planos reside en que sus agujeros imposibles no son tan evidentes; así, un agujero que queda en un nivel puede llenarse con una pieza que se coloque en otro nivel. Los agujeros imposibles se revelan, a veces, como un agujero aislado, o bien como dos o tres agujeros sucesivos aislados en una cara del tablero. Algunos agujeros en las caras o el interior son inviables, en el sentido de que ninguna de las piezas restantes tiene posibilidad de llenarlos.

En la figura 11 se muestra el resultado de jugar las piezas en la secuencia *A, D* y *E*. Al jugar *E*, me preocupaba que el agujero de la casilla 12 del primer nivel estuviera limitado por *D* en dos niveles. ¿Qué piezas pueden encajar en ese agujero? *E* puede hacerlo; pero si se usa, provoca que la casilla 3 del segundo nivel resulte imposible de llenar con cualquiera de las piezas restantes. Podría jugarse *B*, pero conduce pronto a soluciones inviables.

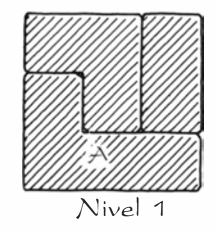
Un método más previsor de buscar la solución podría ser concentrarse en las colocaciones iniciales prometedoras. Empecemos con *A*. ¿Cómo jugar las otras piezas de manera que ocupen parte de la restante zona vacía del nivel más bajo? Por ejemplo, todas las piezas pueden orientarse de modo que ocupen una sola casilla de ese nivel, pero sólo *F* puede orientarse de suerte que ocupe tres casillas de una fila.

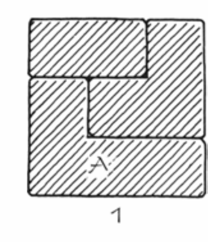
Hagamos una lista de esas formas básicas. Preparemos luego una relación de combinaciones posibles para llenar toda la zona vacía. En la figura 13 se representan cuatro acomodaciones. Las dos primeras son más prometedoras que las dos segundas, dado el número de piezas que intervienen en ellas. Recuérdese que las piezas tendrán que ser compatibles en el segundo nivel. Como las dos primeras colocaciones requieren sólo dos piezas, cabe investigarlas antes de las que requieren tres piezas.

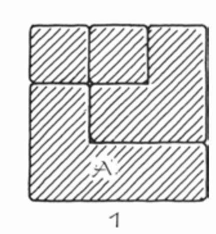
¿Qué piezas pueden formar la primera colocación, manteniéndose compatibles en el segundo nivel? Sólo hay dos posibilidades: *D* y *B*, o bien *B* y *C*. La investigación prosigue cuando la zona vacía del nivel 2 ha de llenarse con el resto de las formas básicas. Si la exploración lleva a un callejón sin salida, habrá que regresar a la segunda de las colocaciones prometedoras que llenaban el primer nivel. Este procedimiento puede reducir la tarea que supone catalogar todas las colocaciones posibles de las piezas. Pero no garantiza el éxito; éste sólo es seguro con el catálogo completo.

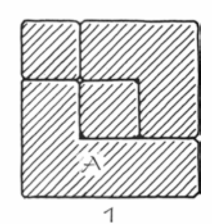


12. Formas básicas

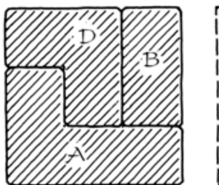


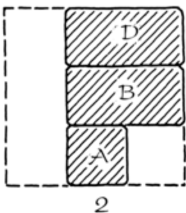


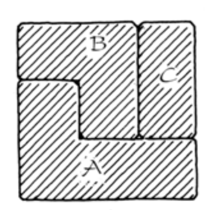


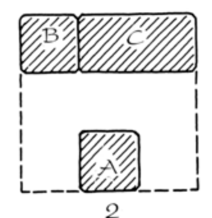


13. Modos de rellenar el nivel 1





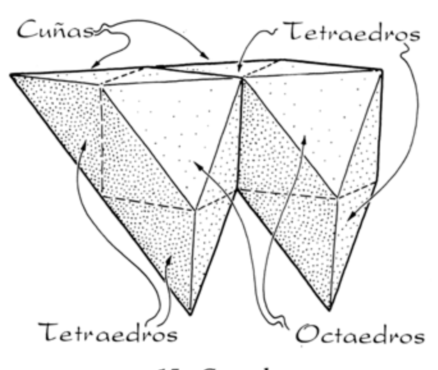




14. Piezas compatibles

El Supercubo Minotauro, de cuatro casillas por arista, consta de ocho pentacubos y cuatro hexacubos. Llamarlo difícil es puro eufemismo. Al proyectarlo, Fisher determinó que el rompecabezas más difícil de este tamaño debía tener doce piezas. Como en el caso del anterior, menor, las piezas son aproximadamente del mismo tamaño, pero en este ejemplo ninguna de ellas posee el suficiente para extenderse de un lado a otro del tablero.

El Supercubo encierra varios rompecabezas. Hay dos maneras de ensamblar las piezas y crear un cubo grande. Una de ellas se vale de un ardid delicioso, consistente en la posibilidad de tomar varias piezas, en conjunto, y resituar éste sobre el resto del cubo para obtener una "solución" diamante. Se pueden construir estructuras escalonadas similares empleando más de 200 combinaciones distintas de las piezas, sin que ninguna de ellas llegue a "transformarse" en cubo. Además, las piezas pueden recombinarse para formar dos cubos (de tres casillas por arista) y una pequeña pirámide.



15. Cunedro

El hallazgo de una de las soluciones correspondientes al cubo grande precisa de mucha paciencia y fina intuición. Para sondear la complejidad del rompecabezas, comencé con uno de los hexacubos "más feos", orientándolo de modo que cinco de sus cubos básicos quedaran en el nivel más bajo del tablero. En ese nivel, el hexacubo poseía cuatro ubicaciones posibles. Podía elevarlo al nivel siguiente, y al siguiente a éste, con cuatro ubicaciones posibles más cada vez. Es decir, la pieza tiene 12 colocaciones de apertura.

Elegida una colocación, añadí otro hexacubo. Este podía colocarse en 96 posiciones posibles. Así, jugando estas dos piezas, el rompecabezas presenta del orden de 1200 vías. Ensayé una de éstas jugando con una tercera pieza, un pentacubo. Resultó que éste presentaba 44 ubicaciones posibles. Las investigué todas considerando los agujeros que quedaban en el tablero y las piezas restantes. Tras haber juntado cuatro o cinco piezas, comenzaron a aparecer algunos agujeros imposibles. Con toda evidencia, este rompecabezas reviste singular dificultad. Me han hablado, sin embargo, de alguien que halló la solución cúbica transformable en diamante y la de los dos cubos pequeños y la pirámide en unas seis horas.

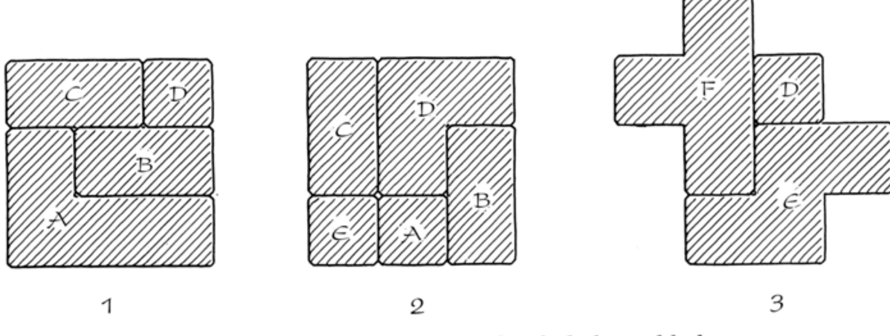
Fisher ha estudiado también rompecabezas de estructuras más extensas. Así, con 25 cualesquiera de los 29 pentacubos diferentes, es posible formar un cubo de cinco casillas por arista. Este problema ofrece múltiples soluciones. Por otra parte, con todos los hexacubos y el tetracubo cuadrado, puede construirse un cubo de 10 casillas por arista.

Asimismo, Fisher ha construido rompecabezas piramidales compuestos de unas piezas que él llama "cunedros". Al diseñar este rompecabezas, comenzó con dos pirámides tetraédricas conectadas por un octaedro. Estos elementos pueden trabarse de tres maneras sin que haya dos caras de los tetraedros que estén en contacto. Uno de estos tres ensamblados da por resultado una forma que Fisher califica de cuña. Las piezas del rompecabezas de cunedros constan de dos cuñas unidas, dispuestas de suerte que no haya dos caras de tetraedro ni dos caras de octaedro que se toquen. Cuando se ensamblan las piezas, se mantiene esta regla relativa al contacto entre caras similares para las piezas contiguas.

La Pirámide de Minotauro consta de cinco cunedros de cuatro tetraedros en cada borde. En su interior, se esconden cuatro espacios vacíos tetraédricos. La Pirámide Gigante Minotauro se compone de 10 cunedros, tiene cinco tetraedros en cada borde y esconde a la vista cinco espacios tetraédricos vacíos. Cinco de sus piezas son iguales a las de la pirámide menor. Fisher ha llevado sus estudios hasta pirámides de mayores tamaños, algunas de las cuales requieren componentes obtenidos según las otras dos maneras de conectar dos tetraedros mediante un octaedro. Todos los rompecabezas piramidales son confusos porque lo inusitado de los ángulos y una "sensación" extraña inhiben la intuición de los jugadores para ajustar las piezas unas con otras. Un entretenimiento curioso puede ser la búsqueda de reglas para ensamblar estos rompecabezas.

Y, para terminar, les desafío con un problema. ¿Puede desarrollarse el cubo pequeño de Fisher en un tablero de bordes enlazados? Las conexiones pueden ser directas, u obtenerse mediante una torsión de un cuarto o de media vuelta. En el primer caso, el cubo puede ensamblarse de la manera normal y luego desplazarse a lo largo de los bordes. ¿Pueden hallarse sobre estos tableros nuevas soluciones únicas para este cubo? En la figura 16 se muestra un ejemplo sencillo.

Los rompecabezas de Fisher, cúbicos y piramidales, pueden adquirirse en Minotaur Designs. Los lectores pueden escribir a 42 Brampton Road, St. Albans, Hertfordshire AL1 4PT, Reino Unido. Los menores cuestan £12,50 y los mayores £24.



16. Una solución para un cubo de lados soldados

Libros

Escombros cósmicos, Mare nostrum y formas de sonata

José Luis Comellas, Joandomènec Ros y Andrés Lewin-Richter

COSMIC DEBRIS. METEORITES IN HISTORY, por John G. Burke. University of California Press; Berkeley, 1986. El tema de los "escombros cósmicos", como ahora es frecuente llamar a los fragmentos de materia que no han llegado a constituir masas planetarias y se extienden por gran parte del sistema solar, no puede estar más de actualidad. Se dice que estos pequeños cuerpos, algunos de los cuales caen de vez en cuando sobre la Tierra en forma de estrellas fugaces, bólidos o meteoritos, pueden proporcionarnos noticias de valor inestimable sobre la génesis de nuestro sistema planetario, sobre la distribución de la materia en la nebulosa primitiva, sobre los procesos de acreción y de diferenciación, y hasta sobre los orígenes de la vida. Esto es lo que puede hacernos sugerente el título principal de la obra que comentamos.

Pero el contenido de un libro viene mejor explicado, por lo general, en el subtítulo. En este caso, John G. Burke, profesor de historia especializado en historia de la ciencia, y actualmente emérito en la Universidad de California en Los Angeles, hace fundamentalmente una historia de los meteoritos –es decir, de los fragmentos de materia cósmica que de hecho han caído sobre la Tierra–; o, por mejor precisarlo, una historia de cómo el hombre ha visto, analizado y estudiado estos objetos. Se trata, por tanto, de un libro de historia de la ciencia. No con ello pierde necesariamente interés su contenido. Los lectores deseosos de estar al día sobre las teorías planetesimales y meteoríticas obtendrán provecho de la lectura de los últimos capítulos. Los primeros constituyen una espléndida síntesis histórico-científica, muy bien informada y documentada, sobre un tema hasta ahora estudiado sólo muy fragmentariamente.

Sobre todo, en este aspecto, la obra de Burke pone de relieve el voluminoso despliegue de la historia de la ciencia, en una secuencia en la que por lo general el orden lógico y el cronológico se superponen con absoluta naturalidad. Burke, casi sin pretenderlo, hace historia del pensamiento científico en general, aun sin olvidarse en ningún momento de los meteoritos; y nos hace ver con luminosa claridad cómo el progreso de la ciencia va unido a una creciente interdisciplinariedad. El objeto concreto de este estudio es un excelente ejemplo: por algo Reinchembach, ya en 1858, hizo notar que los meteoritos constituyen un fenómeno a la vez cosmológico, astronómico, físico, geofísico, químico, mineralógico y meteorológico. Sólo cuando hemos puesto en juego simultáneamente todas estas áreas de conocimiento hemos llegado a saber lo que realmente son.

Y es que los meteoritos –y sus previas manifestaciones meteóricas– constituyen un fenómeno desconcertante. Por una parte, el hombre ha ido encontrando en el suelo minerales que no resultaban consecuentes con su entorno y cuyo origen no era capaz de explicar; por otro, presenciaba fenómenos atmosféricos –estrellas fugaces, bólidos, explosiones– que quedaban más allá de su capacidad de comprensión. Y más dificultades existían aún para establecer una relación razonable entre una cosa y otra.

Toda una larga tradición de milenios, que va de Aristóteles a los ilustrados del XVIII, se caracteriza por su "incredulidad". Parecía demasiado arriesgado suponer que tanto las intrusiones atmosféricas como las piedras extrañas tuviesen un origen extraterrestre. El profesor Burke, agudamente, compara el escepticismo de los sabios históricos sobre los meteoritos con el de los de la segunda mitad del siglo XX acerca del fenómeno "ovni": parece más científico decir que no. Cierto que la negra piedra quemada que apareció en Aegospotami (Tracia) sugirió a Anaxágoras que podía haber caído del Sol: idea de la que Plinio se rió. Pero la doctrina aristotélica sentó para muchos siglos la tesis de que los fenómenos meteoríticos corresponden a los propios del mundo sublunar, y deben encuadrarse entre los "ígneos", al lado del rayo, las auroras polares y las exhalaciones.

La idea no se modificó hasta el siglo XVIII: todo lo más, algunos científicos, como Trent, admitieron que las piedras quemadas podían haber caído... impulsadas por erupciones volcánicas. Apenas hay otra excepción que la de Edmund Halley, un hombre tan desordenado como pródigo en felices intuiciones, que vislumbró que los fenómenos meteoríticos podían ser de naturaleza astronómica, pero sin concretar ni desarrollar su tesis. El giro de la opinión no comenzó a operarse hasta que en 1794 el físico alemán Ernst Chladni publicó *Über den Ursprung von Pallas gefundenen* (sobre el meteorito Pallas, caído en Siberia, el primero cuyo origen no terrestre pudo demostrarse casi con certeza). Para Chladni, tanto los bólidos como las estrellas fugaces, por razón de su velocidad real y de su trayectoria, deben proceder del espacio exterior. Al mismo tiempo, la correspondencia de fenómenos meteóricos con el hallazgo de "nuevas" piedras negras hizo ver la relación que existe entre unos y otras.

La "conversión" de los científicos se operó con sorprendente rapidez en la década 1794-1803, por más que algunos, como Lavoisier, siguiesen empeñados en defender la naturaleza terrestre de las piedras meteóricas. En 1833 se observaron por primera vez las lluvias de estrellas de las Leónidas (que caen todos los días 13 de noviembre); los estudios astronómicos sobre un punto radiante fijo y el mismo para todos los observadores de la Tierra sugirieron no sólo su origen exterior, sino la existencia de un enjambre de corpúsculos cósmicos, aunque no fue hasta 1866, cuando las Leónidas experimentaron un nuevo máximo, cuando se intuyó la naturaleza y estructura del enjambre, así como su vinculación a la órbita de un cometa.

El análisis físico y químico fue evidenciando la realidad. Los 550 meteoritos que cayeron y fueron recogidos en el siglo XIX permitieron establecer una cada vez más perfecta clasificación –por D. Partsch en 1843, Charles U. Shepard en 1846, y en la segunda mitad de la centuria por Rosse o Tchermak– y un análisis cada vez más completo. Se fue determinando la naturaleza de la olivina, la plagioclasa, el piroxeno (aunque muchos de estos nombres son más modernos), etcétera. Se midieron las abundancias de elementos, que no coincidían con las de las rocas terrestres. A fines de siglo, la incredulidad de los científicos se había transformado en todo lo contrario: se atribuía a los meteoritos el origen de la energía solar (hipótesis de Mayer), las auroras polares y hasta los cambios de tiempo at-

mosférico. Pero terminó el XIX sin que se conociera exactamente el origen y el mecanismo de formación de aquellas piedras celestes.

Tras conducirnos hasta el año 1900, el autor hace un inciso (págs. 174-236) para hablarnos de buscadores y coleccionistas de meteoritos –capítulo 6– y del folklore, mitos y utilización de estos objetos –capítulo 7–. Puede parecer una interrupción inoportuna, pero la verdad es que en algún lugar del texto era preciso introducir estos extremos, y éste no es el peor de todos los posibles. Al lado de temas incidentales hay otros más curiosos, como el excelente estudio que se realiza sobre la Kaaba, la piedra negra que los musulmanes veneran como sagrada en La Meca, o los puñales hechos por los hindúes con hierro meteorítico, a falta del extraído del subsuelo.

Los capítulos 8 y 9 (págs. 237-323) los dedica el profesor Burke a las investigaciones realizadas en el siglo XX; a partir de aquí, el texto es perfectamente útil para quienes deseen iniciarse en el conocimiento no sólo de los meteoritos (ninguno de los dos títulos del libro es enteramente apropiado) sino de los "escombros cósmicos" como tales. Los progresos en física atómica y cristalografía por rayos X propiciaron avances definitivos, que permitieron esclarecer las estructuras de Windmanstätten y determinar el proceso de cristalización y el tiempo de formación. El estudio que hace el autor sobre lo que se conoce acerca de la edad de los meteoritos –con todas sus sorprendentes contradicciones– constituye una aportación de conjunto de alta utilidad.

Hoy sabemos muy bien cuál es la naturaleza física, química, mineralógica y cristalográfica de los meteoritos. Podemos calcular la época de su caída en la Tierra y, aunque a veces con menor precisión, cuál es su edad cósmica. No nos cabe la menor duda sobre la existencia de "escombros" en el espacio. La idea de Newton de que ese espacio tiene que estar perfectamente vacío de materia para que puedan verificarse con absoluta precisión las leyes de la mecánica celeste se ha venido aparatosamente abajo. Pero a todo esto, ¿qué son esos escombros cósmicos? ¿Restos de la nebulosa primitiva, planetésimos que no han llegado a acrecer, excrecencias cometarias, resultado de colisiones entre asteroides, piedras rebotadas por impacto, procedentes de la Luna o de Marte? Todavía en 1963 escribía John A. Wood que "probablemente hay tantas opiniones sobre el origen de los meteoritos como estudiosos de los meteoritos". Aunque, añade el autor, hoy el número de hipótesis se ha reducido: afirmación difícil de demostrar, porque la variedad de teorías sigue siendo desconcertante.

Lo que ocurre, en general, es que hoy se cree en la existencia de muchos tipos de escombros cósmicos o, lo que es lo mismo, que todas las hipótesis tienen parte de razón. Hay corpúsculos procedentes de una acreción incompleta, o más bien inhibida por interacciones gravitatorias; otros que proceden de colisiones y fenómenos de "astillamiento" cada vez mejor comprendidos; nadie duda de la vinculación de algunos de los enjambres meteoríticos a órbitas cometarias, y los recientes hallazgos en la Antártida abonan de nuevo la hipótesis del origen lunar o marciano de algunos, muy limitados, ejemplares.

Especialmente sugestivo para el hombre de la calle –y para el lector en general– es el apartado dedicado a los meteoritos como origen de la vida y de la muerte (páginas 312 y siguientes). Desde los estudios de Lipman, un bacteriólogo de Berkeley, por los años 30, sobre la presencia de moléculas orgánicas complejas en algunas piedras meteóricas, se viene hablando de éstas no sólo como portadoras de gérmenes de vida, sino como las introductoras de la vida en la Tierra. Tal hipótesis sigue vigente hoy día, aunque el análisis de piedras similares en la Luna por especialistas de la NASA permite suponer que las moléculas orgánicas son agregaciones posteriores a la caída del material meteorítico sobre la Tierra.

En cuanto a los meteoritos como portadores de la muerte, ¿qué es lo que se puede decir sobre las extinciones repentinas de especies? El autor se ocupa particularmente de la ruptura cretácico-terciario (la famosa extinción de los dinosaurios) estudiada por Luis Alvarez y su equipo californiano, y la ruptura eoceno-oligoceno, estudiada por R. Ganapathy. La aparición en ambos niveles de cantidades anómalas de iridio sugiere un bombardeo meteorítico masivo. El autor sopesa ponderadamente las contradictorias conclusiones de los astrónomos, los geólogos y los paleontólogos.

La catástrofe de Tunguska –en una zona afortunadamente desierta– en junio de 1908, es una muestra de lo que podría ocurrir en un bombardeo a mayor escala. ¿Hay un "fin del mundo" cada 34 millones de años? Y en ese caso, ¿cuándo debe sobrevenir el próximo "fin del mundo"?

El libro, perfecto técnicamente en su edición, se cierra con una copiosa colección de notas y referencias bibliográficas, como hasta ahora era difícil encontrar sobre el tema, y un completo índice de nombres que contribuye a hacer más útil su manejo. (J. L. C.)

FAUNA Y FLORA DEL MAR MEDITERRÁNEO, por Rupert Riedl. Ediciones Omega; Barcelona, 1986. Cuando en 1963 apareció *Fauna und Flora der Adria*, los biólogos marinos de las riberas del Mediterráneo celebraron la incorporación de esta guía de campo, exhaustiva hasta donde puede serlo una obra de esa índole, a la entonces incipiente literatura de identificación rápida de organismos marinos. Su autor era un reputado profesional de la zoología marina que había dirigido más de una expedición austríaca dedicada al estudio de la flora y la fauna marinas del Adriático, y que tres años después publicaría una monografía sobre las cuevas submarinas mediterráneas (*Biologie der Meereshöhlen*) que hoy, dos décadas más tarde, se ha convertido en un clásico no superado.

La idea subyacente a *Fauna und Flora der Adria* era muy simple: que cada uno de los especialistas participantes en las mencionadas expediciones expusiera, en un texto sencillo y a la vez preciso, las características morfoanatómicas, biológicas, ecológicas y de distribución de los distintos taxones de aquel mar. Láminas de una gran calidad, dibujadas en blanco y negro, junto a algunas confeccionadas con fotografías en color, eran el complemento adecuado de unas descripciones concisas de alrededor de 1500 especies de plantas y animales adriáticos.

La guía de Riedl hizo pronto la competencia, con ventaja, a las de Luther & Fiedler, De Haas & Knorr, Campbell y otras de aquellos años. Estas, sin embargo, llegaban a las manos del aficionado hispano traducidas o en versiones originales más asequibles que el alemán, de manera que en muchos casos se utilizaban dos guías a la vez, la seria y completa de Riedl, y la más compendiada y menos general, pero más inteligible, de alguno de los autores citados.

Sin embargo, la guía del Adriático planteaba siempre una duda básica, en especial a los estudiosos de nuestras costas mediterráneas: la especie que se quería identificar, ¿se encontraría en una guía específicamente adriática? ¿No podría ocurrir que se llegara a identificar una especie por la descripción de otra, afín o vicaria, pero distinta? Al mismo tiempo, los conocimientos sobre la flora y la fauna del Mediterráneo en general, y del Mediterráneo occidental en particular, han

aumentado mucho en los últimos años, en buena parte como resultado de la investigación submarina facilitada por la escafandra autónoma. Poner al día esta guía era casi obligado. Riedl así lo hizo en 1983, y *Fauna und Flora der Adria* pasó a ser *Fauna und Flora des Mittelmeeres*. Y en 1986 ha visto la luz la versión castellana, que es la que ahora se comenta.

El libro es fruto de la colaboración de una decena de especialistas, principalmente austríacos, pero también italianos, y otros tantos biólogos marinos de todo el Mediterráneo participaron de manera diversa, por ejemplo facilitando los nombres vulgares de las especies en alemán, castellano, catalán, croata, egipcio, euskera, francés, griego, hebreo, inglés, italiano, marroquí, turco y tunecino. En esta versión *aggiornata* el número de especies tratadas se acerca a las 2000; no sólo se añadieron a las 1500 originales las especies propias de otras zonas del Mediterráneo y que faltaban en el Adriático, sino que muchas de estas últimas fueron sustituidas por otras más típicas de todo el mar. Alrededor de 100 nombres específicos tuvieron también que cambiarse, debido a alteraciones nomenclatoriales. Y la taxonomía ha intervenido asimismo, siendo no pocos los tipos nuevos o los cambios taxonómicos que afectan a algunos de los antiguos grupos sistemáticos. El número de láminas roza las 300, mientras que no llegaban a 250 en la edición original, y cubren buena parte de las especies tratadas; 16 láminas en color agrupan unas 150 especies magníficamente fotografiadas.

Otra novedad con respecto a la edición original es la introducción de mapas de distribución para un reducido número de especies significativas. Mientras que la presencia de tales mapas parece adecuada, resulta discutible su puesta al día; el que esto escribe prolongaría muchas distribuciones hacia el sur del litoral ibérico, por ejemplo.

Excepción hecha de una breve introducción, de un glosario especializado y de índices de láminas y alfabético, el grueso del volumen (760 páginas del total de 858) corresponde a la guía propiamente dicha, con las descripciones de los grupos superiores a la especie (hasta la familia), las de las especies, las ilustraciones, y cuando los hay, los mapas y las láminas en color.

Hay que destacar la bondad de las descripciones, que se han condensado hasta donde ha sido posible y se basan, sobre todo, en la morfología externa. También deben mencionarse los dibujos de Smoky, la esposa del propio autor, a la que éste dedica la obra "por los 20 años de grafismo biológico del Mediterráneo". La ilustración, generalmente muy buena, del organismo entero, va acompañada en ocasiones de dibujos de detalles morfoanatómicos de interés en la determinación; con frecuencia se introducen en la propia ilustración principal indicadores de caracteres diagnósticos (en forma de pequeño segmento), que dirigen rápidamente al lector hacia los rasgos diferenciales destacados en el texto.

Tanto por el volumen de páginas como por el tamaño, *Fauna y flora del mar Mediterráneo* no es un libro de bolsillo, sino una guía de laboratorio, que se consulta con provecho por parte del aficionado y como primera aproximación por parte del especialista, al que el texto remite a monografías más específicas de los distintos grupos (en el apartado Bibliografía de cada clase taxonómica).

Resta decir algo acerca de la edición española, que es precisamente la que se comenta. Desde el punto de vista editorial, nada que indicar salvo el esfuerzo por obtener un libro digno de la edición original; cabría, sin embargo, señalar que en algunas láminas los márgenes se hallan ligeramente cortados, y el dibujo o el nombre específico aparecen mutilados. También, como en cualquier texto actual, el número de erratas tipográficas es mayor de lo que sería deseable. Pero esto son nimiedades en comparación con la insólita traducción con que se obsequia al lector hispano.

Si éste es un aficionado sin el mínimo de conocimientos de biología, se sorprenderá porque todos los grupos taxonómicos de familia para arriba conservan en la versión española su grafía latina. No hubiera sido difícil pasar *Nematomorpha* a Nematomorfos y *Mysidacea* a Misidáceos, por citar los primeros que encuentro; aunque para los términos taxonómicos de nueva creación hubiera sido necesario arriesgarse un poco: Caudofoveados, Limifosóridos, Cavibelonios, etc. La crítica debe hacerse no tanto por haber conservado los términos latinos, cuanto porque unos se han traducido y otros no, sin razón aparente; porque no siempre se han diferenciado tipográficamente los términos latinos de los castellanos; porque ambos se mezclan en frases que exigen mucha voluntad por parte del lector para adivinar de qué se está hablando ("...Bilateria de aspecto similar a los peces..." por "bilaterales pisciformes", por ejemplo). Y, sobre todo, porque se hace alarde de nombres vulgares en hasta 14 lenguas distintas, pero no se es capaz de traducir el latín. Unas veces el lenguaje es telegráfico; otras, la traducción de algún término germano complejo acaba en una frase en la que se explicitan los detalles y minucias más ínfimos. Términos morfológicos que tienen su equivalente castellano desde hace lustros se siguen escribiendo en latín: larva *Trochophora, Lorica, notum*. Sin embargo, se vulgarizan términos precipitadamente: vela en lugar de velo, antenas en lugar de cerata o ceratos, triaul en lugar de triáulico, etc. Cuando no se bautizan términos geográficos (Golfo de Lyon por golfo de León) o ecológicos (aparición por distribución, espacio vital por hábitat, y así otros tantos. El subtítulo "aparición" *aparece* tantas veces como especies, es decir, unas 2000 y en caja alta...). Términos científicos, vulgares, cultos, geográficos, biológicos, todos están igualmente maltratados. Además, la utilización del artículo delante del nombre científico, práctica reprobable y banalizadora, es aquí la tónica: "...la *Sepia officinalis* y la *Sepia rondeleti*...". Hay que hacer un gran esfuerzo para encontrar un párrafo que se salve de la quema.

El *Léxico especializado*, que pretende ser una "Aclaración sobre instrumentos, métodos y conceptos ecológicos..." depara al lector ávido de aclarar sus dudas guindas del siguiente calibre: Cedazo de observación, Charcas de la marea, Depósitos vegetales, Deterioro del clima acuático, Draga a saco, Draga a saco dentada, Euriekia, Frasco de la muerte, Litofitas, Sotobosque marino, Tenazas y Zoocorriente. Son dignas de un diccionario del disparate las definiciones de Prados marinos y Trottoir.

En resumen, y para no seguir: una excelente guía de campo que, a lo largo de 20 años, se había ganado una merecida fama, es hecha trizas en la versión castellana (?) que nos depara una editorial que, sorprendentemente, es sin lugar a dudas la primera de España por su producción de textos de biología y ciencias naturales y ha alcanzado un prestigio notable por la edición de guías de campo, traducidas u originales, como la que nos ocupa. Si se pasa una rápida revista a los traductores de estas guías (que deben superar la cuarentena de textos sobre prácticamente todos los grupos vegetales y animales, acuáticos y terrestres, silvestres y domésticos, y aun geológicos y astronómicos) se advierte que se trata de especialistas en el tema: son zoólogos, botánicos, ornitólogos, entomólogos, etc., lo que les permite, cuando es el caso, ampliar el texto original, corre-

girlo si viene a cuento, etc. Desconozco cuál sea la especialidad de la traductora, pero desde luego no es la zoología, ni la botánica, ni la biología marina, ni aun la geografía. Aunque no discuto sus conocimientos de alemán, es evidente que es preciso algo más que el dominio de un idioma para traducirlo. Ya se sabe lo de *traduttore, traditore*, pero en este caso estamos ante un ejemplo flagrante de *traduttore, tortore*. El que esto firma ha invertido no pocas horas en traducir primero, y en intentar hacer inteligibles, después, textos (como los que se citan, o de otro tipo) de su especialidad, y conoce sobradamente la dificultad de traducir libros especializados. Es precisamente por ello por lo que desaguisados de este tipo deben denunciarse y proscribirse, por el bien del posible lector y, sobre todo, por el de la biología marina. (J. R.)

FORMAS DE SONATA, por Charles Rosen. Editorial Labor; Barcelona, 1987. El concepto musical de sonata define una época de la evolución de la música occidental culta. Si en un principio se presentó como un género acabó siendo forma de casi toda la producción de un determinado período de la historia de la música. Aunque el nombre de sonata suele restringirse a obras para uno o dos instrumentos, constituye, en sí misma, una arquitectura que cubre desde arias de ópera hasta conciertos con solista y orquesta, cuartetos de cuerda y sinfonías. Se puede afirmar que apenas si existe obra desde Haydn hasta Schubert que no utilice este tipo de estructura, que, si en un principio fue más o menos libre, acumularía andando el tiempo reglas hasta convertirse en estereotipo de sí misma; por eso el movimiento romántico empezó a alejarse de ella, por considerarla "clásica". La sonata se convirtió en una estructura racional que resolvía el dramatismo de una pieza con una serie de pasos muy bien estudiados que, en manos de compositores como Haydn, Mozart, Beethoven y Schubert, se trocaron en elementos de expresión llevados a un grado de gran perfección sin que se apreciara el rigor de la camisa de fuerza.

Debemos referirnos a ella como la forma musical de un solo movimiento, y no el conjunto constituido por lo que se ha dado en llamar sonata, sinfonía u otro género musical. En su acepción usual consta de tres partes: exposición, desarrollo y recapitulación. La exposición presenta el material temático principal, establece la tónica y modula la dominante o alguna otra tonalidad íntimamente relacionada. El primer tema o primer grupo de temas entra en la tónica. El segundo tema o segundo grupo de temas se ofrece en la dominante; suele tener un carácter más lírico. Después, aparece un tema conclusivo (o varios) con una función cadencial.

En el desarrollo se fragmentan los temas de la exposición y se reelaboran en combinaciones y nuevas secuencias. El final del desarrollo prepara el regreso a la tónica con la retransición. La recapitulación se inicia con la reaparición del primer tema en la tónica. Resume la exposición tal como se tocara al principio, con la salvedad de que el segundo grupo y el tema conclusivo llegan en la tónica, preparando lo que va a seguir en esta última. Las obras de más extensión se redondean con una coda.

La sonata para instrumento solista fue un género muy extendido entre los aficionados y, sobre todo, entre las aficionadas. (De ahí la gran cantidad de sonatas para clave.) Esa es la razón por la que muchas de estas piezas son fáciles de tocar, bastante más que obras escritas antes, como las "Variaciones Goldberg" de J. S. Bach. Se trata de piezas sin ornamentación elaborada, que no requerían especial habilidad profesional, si bien estaban escritas con gran esmero. Eran obras ideales por su claridad, su sencillez y su seriedad. Encajaban en un contexto social de una clase urbana ansiosa por alcanzar una cultura superior, en coincidencia con el desarrollo de un sistema tonal eficiente y una estética neoclásica. Llegó a formar parte del concepto de música pura, independiente de los sentimientos.

La sonata aventaja a otras formas musicales anteriores por su claridad dramatizada. Se inicia con una oposición nitidamente definida que se intensifica para resolverse después simétricamente; la forma individual era fácil de captar en las ejecuciones públicas. Merced a las técnicas de intensificación y dramatización mantenía el interés de un gran auditorio. Podía ser dramática sin recurrir al acompañamiento de palabras y sin el virtuosismo instrumental o vocal.

La evolución que conduce a la sonata parte de formas ternarias (ABA) y binarias ya utilizadas hacia 1730, que, en la obra de Mozart, poseerían ya forma de sonata. Tuvo por padre a Domenico Scarlatti, y es la influencia italiana la que llevaría a su estructuración inicial, que también hallaremos en las sinfonías de Giovanni Battista Sammartini. En Alemania, su máximo cultivador fue Carl Philip Emanuel Bach, interesado por una expresión íntima e intensa, explorando las posibilidades de la disonancia y las relaciones tonales remotas. Ello explica la unidad de tema y unidad de sentimiento que descubrimos en sus obras.

Hacia 1757 conviven múltiples esquemas. Rosen se entretiene en analizar las compuestas para clave por Giovanni Marco (Placido) Rutini. Trece años más tarde, la sonata se ha desarrollado de forma polifacética, su unidad es estilística y consiste en la relación de todos esos métodos posibles entre sí dentro de un lenguaje musical coherente. Hacia 1780 se puede hablar del triunfo del estilo sonata o de un clasicismo vienés; formas anteriores como el rondó, el concierto, la fuga, el aria da capo y la forma ternaria se han convertido en sonatas, según dan fe la obra de Haydn y la de Mozart. En la forma de sonata el significado de una frase dependía de su lugar dentro de la obra en su conjunto, de su posición dentro del movimiento general que va de la polarización a la resolución. El motivo articula la estructura poniendo de relieve sus puntos cruciales; la estructura reinterpreta el motivo, dándole en cada aparición un significado nuevo a menudo radicalmente distinto.

Hacia 1800 el modelo a seguir era Mozart, si bien Francia prefirió el modelo Haydn, que ejerce su influencia en Mehul y Cherubini. Pero la evolución siguió dos caminos: el de Beethoven a partir de sus sonatas op. 31 y su "Heroica", donde reafirma la oposición binaria directa de tónica y dominante que conservó en lo sucesivo, y el de Schubert, muy bien reflejado en el primer movimiento de la sonata op. 137 n.º 3 para violín y piano (D. 408) de 1816, en un contraste sucesivo de temas y tonalidades colorísticamente dispuestas. A partir de 1830 la forma de sonata había adquirido su arquitectura, pero ya era un modelo clásico, utilizado magistralmente por Bruckner y Brahms, en creaciones monumentales y académicas. Richard Wagner, en cambio, lo repudiaría.

El libro de Rosen constituye una exposición amplia y detallada, escrita con un gran sentido pedagógico por un especialista en la materia, intérprete y profesor de piano en la Universidad de Nueva York. Ilustra cada paso con un análisis minucioso y tejido por múltiples ejemplos musicales, extensos, que convierten a la obra en una pieza de consulta obligada por parte de expertos, estudiosos y aficionados. No se limita a los ejemplos pianísticos; abundan los procedentes de cuartetos de cuerda, sinfonías, arias de ópera y otras formas instrumentales. (A. L.-R.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

ANATOMIA DE LA MEMORIA

MEMORIES AND HABITS: TWO NEURAL SYSTEMS. Mortimer Mishkin, Barbara Malamut y Jocelyne Bachevalier en *Neurobiology of Learning and Memory*, dirigido por Gary Lynch, James L. McGaugh y Norman M. Weinberger. The Guilford Press, 1984.

THE AMYGDALA: SENSORY GATEWAY TO THE EMOTIONS. John P. Aggleton y Mortimer Mishkin en *Emotion: Theory, Research, and Experience, Vol. 3*, dirigido por Robert Plutchik y Henry Kellerman. Academic Press, 1985.

AMYGDALECTOMY IMPAIRS CROSSMODAL ASSOCIATION IN MONKEYS. Elisabeth A. Murray y Mortimer Mishkin en *Science*, vol. 228, n.° 4699, págs. 604-606; 3 de mayo de 1985.

SEQUIA EN AFRICA

POLITICAL AND ECONOMIC ORIGINS OF AFRICAN HUNGER. Michael F. Lofchie en *The Journal of Modern African Studies*, vol. 13, n.° 4, págs. 551-567; diciembre, 1975.

POVERTY AND FAMINES: AN ESSAY ON ENTITLEMENT AND DEPRIVATION. Amartya Sen. Oxford University Press, 1981.

DROUGHT AND HUNGER IN AFRICA: DENYING FAMINE A FUTURE. Dirigido por Michael H. Glantz. Cambridge University Press, 1987.

MECANISMO MOLECULAR DE LA FOTOSINTESIS

PHOTOSYNTHESIS, VOL. 1: ENERGY CONVERSION BY PLANTS AND BACTERIA. Dirigido por Govindjee. Academic Press, 1982.

MOLECULAR GENETICS AND THE LIGHT REACTIONS OF PHOTOSYNTHESIS. Douglas C. Youvan y Barry L. Marrs en *Cell*, vol. 39, n.° 1, págs. 1-3; noviembre, 1984.

THE STRUCTURAL BASIS OF PHOTOSYNTHETIC LIGHT REACTIONS IN BACTERIA. Johann Deisenhofer, Hartmut Michel y Robert Huber en *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 10, n.° 6, págs. 243-248; junio, 1985.

OBSERVATORIOS DE ONDAS GRAVITATORIAS

GRAVITATION. Charles W. Misner, Kip S. Thorne y John Archibald Wheeler. W. H. Freeman and Company, 1973.

SOURCES OF GRAVITATIONAL RADIATION. Dirigido por Larry L. Smarr. Cambridge University Press, 1979.

THE SEARCH FOR GRAVITY WAVES. P. C. W. Davies. Cambridge University Press, 1980.

HUNDIMIENTO DE LOS VOLCANES

CATASTROPHIC DEBRIS STREAMS (STURZSTROMS) GENERATED BY ROCKFALLS. Kenneth J. Hsü en *Geological Society of America Bulletin*, vol. 86, n.° 1, págs. 129-140; enero, 1975.

VOLCANIC DRY AVALANCHE DEPOSITS-IDENTIFICATION AND COMPARISON WITH NONVOLCANIC DEBRIS STREAM DEPOSITS. Tadahide Ui en *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 18, n.° 1/4, págs. 135-150; octubre, 1983.

LARGE VOLCANIC DEBRIS AVALANCHES: CHARACTERISTICS OF SOURCE AREAS, DEPOSITS, AND ASSOCIATED ERUPTIONS. Lee Siebert en *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 22, n.° 3/4, págs. 163-197; octubre, 1984.

CATASTROPHIC DEBRIS AVALANCHE DEPOSIT OF SOCOMPA VOLCANO, NORTHERN CHILE. P. W. Francis, M. Gardeweg, F. Ramirez y D. A. Rothery en *Geology*, vol. 13, n.° 9, págs. 600-603; septiembre, 1985.

ADAPTACIONES AL BUCEO DE LA FOCA DE WEDDELL

SEAL LUNGS COLLAPSE DURING FREE DIVING: EVIDENCE FROM ARTERIAL NITROGEN TENSIONS. Konrad J. Falke, Roger D. Hill, Jesper Qvist, Robert C. Schneider, Michael Guppy, Graham C. Liggins, Peter W. Hochachka, Richard E. Elliott y Warren M. Zapol en *Science*, vol. 229, n.° 4713, págs. 556-558; 9 de agosto de 1985.

HEMOGLOBIN CONCENTRATIONS AND BLOOD GAS TENSIONS OF FREE-DIVING WEDDELL SEALS. Jesper Qvist, Roger D. Hill, Robert C. Schneider, Konrad J. Falke, Graham C. Liggins, Michael Guppy, Richard E. Elliott, Peter W. Hochachka y Warren M. Zapol en *Journal of Applied Physiology*, vol. 61, n.° 4, págs. 1560-1569; octubre, 1986.

MICROCOMPUTER MONITOR AND BLOOD SAMPLER FOR FREE-DIVING WEDDELL SEALS. Roger D. Hill en *Journal of Applied Physiology*, vol. 61, n.° 4, págs.1570-1576; octubre, 1986.

LA MAQUINA DE CONEXION

THE CONNECTION MACHINE. W. Daniel Hillis. The MIT Press, 1985.

MASSIVELY PARALLEL COMPUTERS: THE CONNECTION MACHINE AND NON-VON. Richard P. Gabriel en *Science*, vol. 231, n.° 4741, págs. 975-978; 28 de febrero de 1986.

SPECIAL ISSUE ON PARALLELISM. *Communications of the ACM*, vol. 29, n.° 12, diciembre, 1986.

LA MIELINA

THE REPETITIVE PROPAGATION OF ACTION POTENTIALS DESTABILIZES THE STRUCTURE OF THE MYELIN SHEATH: A DYNAMIC X-RAY DIFFRACTION STUDY. R. Padrón y L. Mateu en *Biophysical Journal*, vol. 39, págs. 183-188; 1982.

LOOSENING OF PARANODAL MYELIN BY THE REPETITIVE PROPAGATION OF ACTION POTENTIALS. O. Morán y L. Mateu en *Nature*, vol. 304, págs. 344-345; 1983.

THE STRUCTURAL STABILITY OF LOW DENSITY LIPOPROTEINS: A KINETIC X-RAY SCATTERING STUDY OF ITS INTERACTION WITH ARTERIAL PROTEOGLYCANS. L. Mateu, E. M. Avila, G. Camejo, V. León y N. Liscano en *Biochim. et Biophys. Acta.*, n.° 795, págs. 525-534; 1984.

JUEGOS DE ORDENADOR

AMUSEMENTS IN MATHEMATICS. Henry Ernest Dudeney. Dover Publications, Inc., 1958.

TALLER Y LABORATORIO

THE SHAPE OF SPACE: HOW TO VISUALIZE SURFACES AND THREE-DIMENSIONAL MANIFOLDS. Jeffrey R. Weeks. Marcel Dekker, Inc., 1985.

KNOTTED DOUGHNUTS AND OTHER MATHEMATICAL AMUSEMENTS. Martin Gardner. W. H. Freeman and Company, 1986.